

고출력 고주파 증폭기의 설계

남 상훈 전 명환 김 영수
포항공과대학교 가속기연구소 저장링 개발단

Design of High Power RF Amplifier

S.H. Nam, M.H. Joon, Y.S. Kim
Pohang Accelerator Laboratory Storage Ring Division
Pohang University of Science and Technology

Abstract

In an electron storage ring of Pohang Light Source (PLS), electrons lose their energy in every turn by the synchronous radiation. A high power RF amplifier is employed to compensate the electron energy that is lost by the synchronous radiation. The specification of RF amplifier is an continuous output power of 60 kW at 500.082 MHz operating frequency. The power is supplied to RF cavities in the storage ring tunnel. Total number of amplifier system currently required is three. The total number will be increased upto five as the operating condition of storage ring is upgraded. The RF amplifier is mainly consisted of a high voltage DC power supply, an intermediate RF power amplifier (IPA), and a klystron tube. In this article, the design of RF amplifier system and characteristics of the klystron tube will be discussed.

1. 서론

가속기연구소의 포항방사광가속기 (PAL)는 선형가속기와 원형가속기로 구성된다. 선형가속기에서 가속된 전자빔이 원형가속기로 주입된 후 전자의 에너지(초기 주입시 약 2.0 GeV)는 원형가속기의 궤도를 한바퀴 돌 때마다 생긴 손실로 일정량 감소하게 된다. 따라서 이 손실된 에너지의 보상을 해주어 장시간 초기 주입시의 에너지를 가진 전자빔이 원형가속기에 저장되도록 하여야 한다. 원형가속기에서 이 전자 에너지의 보상을 담당하는 부분이 RF 시스템이다. RF 시스템의 구성은 RF 공급원, 전송 선로, RF 공동으로 구성되어 있다. 본 논문에서는 60 kW 고주파 증폭기의 설계와 특성, 클라이스트론의 특성 등에 관하여 논하고자 한다.

2. 증폭기의 구성

표 1에서는 60 kW CW 고주파 증폭기의 사양을 보여준다. 표 1과 같이 증폭기 시스템은 500.082 MHz의 주파수를 가진 RF를 60 kW의 안정된 출력으로 계속 공급한다. 증폭기는 크게 입력 전원부, 고전압 직류 전원부, 진단 RF 증폭기부 (IPA), 증폭기 콘트롤 및 보호 회로부, 클라이스트론 튜브, HEATER와 ION-PUMP 전원부, 포커스 전원부, 모니터링부 등으로 구성되어 있다.

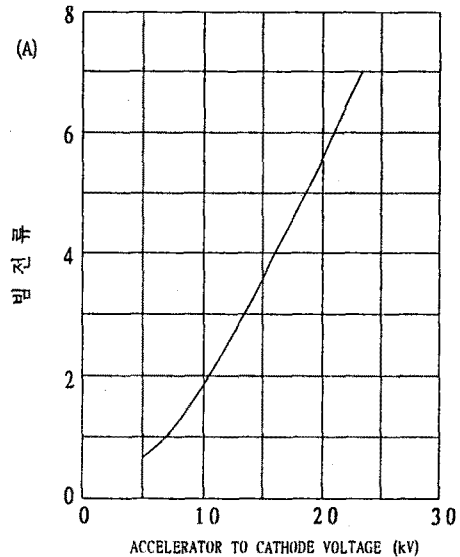


그림 1 YK 1265 클라이스트론의 V-I 특성

Fig 1 V-I Characteristic of YK 1265 CW Klystron

표 1 60 kW CW 고주파 증폭기의 사양

Table 1 Specifications of 60 kW CW RF Amplifier

Operating Frequency:	500.082 MHz
Output Power:	60 kW minimum
Output Stability:	less than $\pm 1\%$
Output Dynamic Range:	more than 35 dB
Output Impedance:	50 ohm
Bandwidth:	2 MHz at -3dB points
Load VSWR (Max.):	1.5 : 1
Input VSWR (Max.):	1.3 : 1
Harmonic content of output:	less than -30 dBc
Spurious & sideband level:	less than -60 dBc

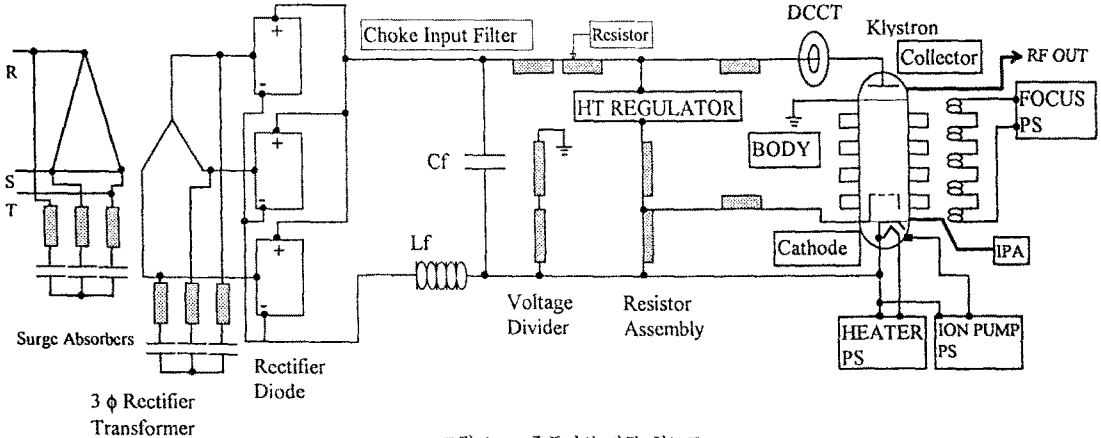


그림 2. 증폭기의 간략 회로도
Fig 2. Circuit Diagram of 60 kW CW RF Amplifier.

2.1 클라이스트론

증폭기 시스템의 구성 중 가장 중요한 부분은 클라이스트론 튜브이다. 클라이스트론은 Philips사에서 제작된 고 출력 TV 전송용으로 많이 쓰이는 YK1265를 선택하였다. YK1265는 사용 주파수에서 최대 65 kW까지 출력이 가능하다. 클라이스트론에 관한 상세한 사양은 표 2에 열거하였다. 그림 1에서는 YK-1265 클라이스트론 튜브의 V-1 특성을 보여주었다.

2.2 고압 직류 전원부 (Klystron High Voltage Supply)

안정된 RF 출력을 얻기 위하여는 클라이스트론에 빔 전력을 공급하는 고압 직류 전원부의 세심한 설계가 요구된다. 또한 클라이스트론의 보호와 운전의 안전이 설계에 반영이 되어 한다. 직류 전원 장치의 사양은 표 3에 열거하였다. 그림 2는 직류 전원부의 간략한 회로도이다. 그림 2에 보여준 바와 같이 직류 전원부의 구성은 삼상 Δ -Y 승압 변압기와 전파 정류기, LC 필터, HT 전압 안정기, HEATER와 ION-PUMP 전원부, FOCUS 전원부, 전압과 전류 모니터부, 클라이스트론 등으로 되어 있다. 일차적인 직류 고압을 얻기 위하여 CHOKE INPUT 필터를 사용하였으며 최종 리플은 $\pm 0.1\%$ 이하이다. 최종적으로 부하인 클라이스트론에 인가되는 직류 전압은 입력 전압의 변동에 능동적으로 대처 가능한 HT 전압 안정기를 사용하여 안정시켰다. HEATER와 ION-PUMP 전원부는 클라이스트론 캐소드에 직접 연결되어야 하므로 고압 절연 변압기를 사용하여 교류 입력 전원 (단상 277 Vrms)과 분리시켰다. FOCUS 전원부는 일반적인 SCR 위상 조정 방식을 사용하여 필요한 출력을 얻는다. 빔 전압의 측정은 저항 전압 분리기를 사용하였으며 빔 전류의 측정은 직류 전류 트랜스 (DCCT)를 사용하였다. 클라이스트론에 인가되는 전압은 캐소드와 플렉터 간에 전계가 걸리며 클라이스트론 몸체는 접지를 시켜 HT 안정기를 이용 전압 안정도를 높이기 설계되었다. 본 논문에서는 60 kW RF 증폭기의 구성부 중 고압 직류 전원부의 설계에 초점을 맞추어 설명하려 한다.

고압 직류 전원부의 입력 전압은 선간 전압 480 Vrms이며 이 전압은 Δ -Y 승압 변압기를 이용 선간 전압 22.6 kVrms로 승압된다. 표 4에는 Δ -Y 승압 변압기의 사양을 보여준다. 승압된 고압 교류는 표 5에 열거된 사양을 충족하는 전파 정류 다이오드를 거쳐 정류된 후 5 H 초크 (Choke)와 4.0 μ F 커패시터로 구성된 필터를 거쳐 리플 사양을 만족하는 고압 직류 전압을 만든다. 고압 변압기의 설계에서는 변압기와 정류 다이오드부에서 강해지는 전압의 양을 고려하였다. 일차측에는 탭 (Tap)을 사

표 2 YK1265 클라이스트론의 사양

Table 2 Specification of YK1265 CW Klystron

Frequency Range:	470 to 860 MHz
Operating Frequency:	500.082 MHz
Output Power:	63 kW
Beam Voltage:	25.5 kV
Beam Current:	5.7 A
Accelerator to Cathode Voltage:	22 kV
Body Current:	~ 35 mA
Focusing Coil Current:	~ 10.5 A
Bandwidth at -3dB Point:	3 MHz
Drive Power:	~ 20 W
Saturated Efficiency:	43 %
Cooling:	Forced Air and Water
Heater Voltage:	8.3 V (7.8 V after 600 hr)
Heater Current:	24.6 A

표 3 고압 직류 전원 장치의 사양

Table 3 Specification of High Voltage DC Power Supply

Input Voltage:	Three phase, 480 V, 60 Hz
Output Voltage:	27 kVDC
Output Voltage Range:	22 kV - 27 kV in 1-2 kV step by tap change
Output Current:	7 A DC
Output Power:	~ 189 kW
Filter:	Choke input filter
Regulation:	$< \pm 0.5$ %
Ripple:	$< \pm 0.1$ %

용하여 출력 전압을 22.5 kVDC에서 27kVDC까지 조정 가능토록 했다. 정류 다이오드의 칩두 역 전압 (Peak Inverse Voltage, V_{PIV})에는 2.0의 안전 계수를 적용하였고 전류에는 3.0의 안전 계수를 적용하여 설계하였다. 각 다이오드에는 RC 병렬 스너비 (Parallel Snubber)를 사용하여 전압의 일정 배율이 분포되도록 하고 과도 현상에 대비하도록 설계하였다. RC 스너비의 조건으로는 다음 두가지 항목에 중점을 두었다.

$$1. R_s \text{를 통한 전류} = \text{다이오드의 역전류} \times 10 \\ = (V_{PIV} / N) \times (1/R_s)$$

표 4 승압 정류 변압기의 사양

Table 4 Specification of 3 φ Rectifier Transformer

- Primary Voltage:	0 to 480 Vrms, line to line
- Secondary winding table:	
a. Voltage:	22,600 (-0 + 2%) Vrms line to line
c. Full Load Current:	7.3 Arms maximum
- Circuit Connection:	delta-wyc
- Load Factor:	100%
- Exciting current:	3% maximum of full load I
- Impedance:	10 ± 0.25%
- Efficiency:	98% minimum

표 5 정류 다이오드의 사양

Table 5 Specification of Rectifier Diode

V _{nv} per Rectifier Leg:	56.7 kV
Safety Factor of V _{nv} :	2.0
Peak Diode Current per Leg:	480 A for 16 ms
RMS Diode Current per Leg:	35 Arms
Safety Factor of Current:	3.0
VA Rating of Rectifier Diode Leg:	369.9 kVA
Number of Diodes per Rectifier Leg:	36
V _{nv} of each Diode:	1,600 V

2. C_s >> 다이오드의 누설 (Stray) 커패시턴스

여기에서 R_s 는 스니버의 저항, V_{nv} 는 각 상의 정류 다이오드 집합의 침투 역전압, N 은 각 상의 다이오드 총 수, C_s 는 스니버 커패시턴스를 나타낸다.

필터의 구성은 Choke Input Filter 이며 삼상 전파 정류 회로의 임계 인덕턴스 L_{ef} 는 다음 식으로 나타낼 수 있다⁽¹⁾.

$$L_{ef} = \frac{R_L}{664 f} \quad [1]$$

리플 감소 계수 r 는 다음과 같다⁽²⁾.

$$r = \frac{1}{1 - \omega^2 L_f C_f} = \frac{V_{ro}}{V_{ri}} \quad [2]$$

식 1, 2 에서 R_L 는 부하의 저항값, f 는 입력 교류 전원의 주파수 (60 Hz), V_{ri} 는 입력 리플 침투 전압치, V_{ro} 는 필터 출력 침투 전압치, ω = 2π × 6f, L_f 는 필터의 인덕턴스, C_f 는 필터의 커패시턴스이다. 앞에서 언급된 바와 같이 L_f 와 C_f 의 값은 5 H 와 4.0 μF 으로 선택했으니 리플은 약 -40dB 감소됨을 알 수 있다. 필터를 거친 후 27 kVDC 출력에서 리플 주파수에서의 최종적인 리플의 침투치는 약 15.2 V가 된다. 이 값은 표 3에 보여준 사양을 충분히 만족시킨다.

고압 변압기의 일차측에는 과도 전압 감쇠 회로 (Primary Surge Absorber)를 사용하여 이차측에서 발생하는 다이오드의 커패시턴스 과도 전압과 일차측에서의 여진 전류의 급작스런 제동에 따른 과도 전압 등을 정적 전압의 2배수 이내로 감소시켰다. 일차측 과도 전압 감쇠 회로의 설계에는 아래의 4가지 조건을 만족하게 하였다.

1. C_d >> C_s'
2. 일차측 공명 주파수 f' ~ 60 Hz
3. QUALITY FACTOR $Q = \frac{\omega' L_E}{R_d} = 2.0$
4. L_{eq}' << L_E

위 조건에서 C_d는 25 μF의 감쇠 회로 커패시턴스, C_s'는 변압기의 누설 커패시턴스, ω' = 2πf', L_E 는 변압기의 자화 인덕턴스, L_{eq}'는 일차측 누설 인덕턴스, R_d는 30Ω의 감쇠회로 저항을 나타낸다. 고압 변압기의 이차측에도 또한 감쇠회로를 사용하여 과도 현상시 발생하는 고유 공명 주파수 (10 ~ 50 KHz)를 10배 이하로 감소시켰으며 감쇠저항을 이용하여 고압 회로내 어느 부위에서든 과전압이 정적전압의 2배 이하가 되도록 설계하였다. 설계 조건은 다음과 같다.

1. $\frac{C_t}{C_s} \geq 100$
2. $Q = \frac{\omega_s L_{eq}}{R_t} \cong 2.0$

여기에서 C_t 는 변압기 이차측에서 본 총 커패시턴스, C_s 는 이차측 누설 커패시턴스, ω_s = 2πf_s, f_s 는 이차측 공명 주파수, L_{eq} 는 누설 인덕턴스, R_t 는 이차측에서 본 총 저항이다. 이차측의 과도 전압 감쇠 회로의 저항 R_{ds}는 20 kΩ이 그리고 커패시턴스 C_{ds}는 11 nF을 선택하였다.

그림 2에 있는 HT 전압 안정기 (HT Regulator)는 클라이트론의 몸체와 캐소드 간의 전압 변화를 억제하여 RF 출력의 위상을 안정케 하는 장치이다. 안정 회로의 동작 원리는 저항집합 (Resistor Assembly)의 전류를 일정하게 유지하는 것이다. 따라서 입력 전압의 변동에 따른 고압 직류의 변화는 클라이트론의 몸체와 플렉터 사이로 전달되고 몸체와 캐소드 간의 전압은 일정하게 된다. 이 안정 회로는 누설 저항 조합 (Resistor Assembly)의 마지막 저항에 걸리는 전압을 측정하여 전류의 양을 조절하도록 되어 있다. 조절 범위는 입력 전압 변동의 ±1%이다.

2.3 RF 전단 증폭기

클라이트론은 외부에서 공급되는 RF 신호를 증폭하는 기능을 하므로 외부에서 충분한 입력신호를 넣어주어야 한다. 외부 RF 신호 발생원에서 공급되는 신호는 0 - 10 dBm이며 클라이트론의 요구 입력 신호량은 20 W (43 dBm)이다. 따라서 클라이트론과 외부 신호 공급원 사이에 증폭기가 필요하다. 반도체 소자를 사용하여 설계한 이 증폭기는 3 단계 증폭 과정을 거친다. 이 증폭기는 RF 출력 안정도가 ±1% 이내이고 위상 안정도는 2°이내이다. 이득은 약 40 dB이다.

3. 결론

본 팀은 현재 포항공기연구소의 원형가속기에 필요한 RF 원의 설계를 끝냈으며, 1994년 말까지 제작과 실험을 거쳐 실질적인 운전에 들어갈 예정이다.

4. 참고 문헌

- (1) W. M. Flanagan, Handbook of Transformer Applications, McGraw-Hill, New York, 1986.
- (2) F. E. Terman, Radio Engineers' Handbook, McGraw-Hill, New York, 1943.