

150MW 펄스 MODULATOR의 설계 및 동작특성

박성수*, 오종석, 이경태, 김상희, 손윤규, 최관, 장성덕, 박상복, 남상훈, 조부연, 남궁원

포항공대 가속기 연구소 선형 가속기 개발단, (주) 제철전기 콘트롤*

Design and Operational Characteristics of 150MW Pulse Modulator

S. S. Park*, J. S. Oh, K. T. Lee, S. H. Kim, Y. K. Son, K. Choi, S. D. Chang*, S. H. Park*, S. H. Nam, M. H. Cho, W. Namkung
Pohang Accelerator Laboratory LINAC, Pohang Institute of science and technology, POSCON*

Abstract

The design beam energy of PLS(Pohang Accelerator Laboratory) Linac is 20GeV. The linac employs total 11 units of modulators and klystrons. The maximum peak output powers of the modulators are 200MW (400kV, 500A, 4.4μs flat-top, 800Q load) to drive the klystrons which have the peak microwave power of 80MW. Prior to the development of the 200MW modulators, a prototype 150MW modulator has been constructed and tested. We have achieved output pulses of 350kV, 420A and 3.5μs flat-top with 840Q water load. In this article, the test results and computer simulations of charging, De-Q'ing, and discharging are presented.

1. 서 론

포항 가속기 연구소 선형 가속기는 20GeV의 전자에너지를 얻기 위해 200MW 고출력 Modulator와 80MW Klystron이 총 11대가 필요하다.

200MW Modulator를 만들기 위한 시제품으로 150MW Modulator를 제작하여 시험중에 있다. 200MW Modulator는 80MW급 이상의 Klystron 부하를 필요로 하고, 150MW Modulator는 65MW Klystron 부하를 필요로 하는데 현재는 Klystron 부하를 물저항 부하로 대체하여 원하는 출력보다 작은 출력으로 시험하고 있다. 150MW Modulator는 840Q의 부하에서 350kV, 420A, 3.5μs Flat-top을 갖는 펄스를 만들고, 200MW Modulator는 800Q의 부하에서 400kV, 500A, 4.4μs Flat-top을 갖는 펄스를 만든다.

본 논문은 기계화된 150MW Modulator를 중심으로 200MW Modulator를 비교 설명하였으며, 전체 계통을 고전압 전원부, 충전부, 방전부로 나누어 설명하였고, 시뮬레이션과 실험결과를 보였다.

2. Modulator와 부하의 사양

20GeV의 전자에너지를 얻기 위해 65MW급 이상의 RF출력을 갖는 Klystron이 필요하다.

현재 고출력 Klystron 제작사는 SLAC(Stanford Linear Accelerator Center)과 Toshiba가 있다. 150MW급의 Modulator에는 SLAC 5045 Klystron 진공관과 200MW급의 Modulator는 Toshiba E3712 Klystron 진공관이 적당하다. 표 1에는 150MW와 200MW급의 설치값과 실제 요구되는 값들을 제시한다.

표 1 Modulator의 주요 매개변수
Table 1 Main Parameters of Modulator

	150MW for SLAC Tube	200MW for Toshiba Tube
Peak Power(MW)	150	200
Ave. Power (kW) Required Designed	66 66	97 289
Peak Out. Voltage(kV)	350	400
Repetition Rate(PFS) Required Designed	10-60 60	10-60 180
Equi. Pulse Width(μs)	6.56	7.5
Flat Top Pulse Width ($\pm 0.5\sigma$)(μs)	3.5	4.4
PFN Impedance (Ω)	3.73	2.8
Thyratron Peak Power(MW) Ave. Power(kW)	ITT F-241 125 200	ITT F-303 200 200

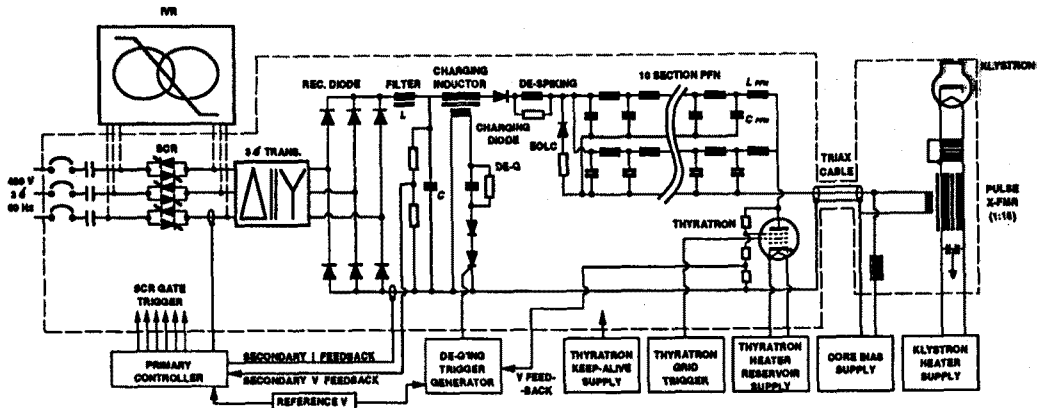


그림 1 Modulator 전체 회로도
Fig 1 Circuit Diagram of Modulator

3. 150MW급 Modulator

150MW급 Modulator의 계원은 표 1에 나타낸 것과 같고 고전압 전원부, 충전부, 방전부로 나누어 설명한다. 그림 1은 Modulator 회로의 개략도이다.

3.1 고전압 전원부

고전압 전원공급장치는 3상 유도전압조정장치, 3상 변압기, 정류기, LC필터로 구성된다.

입력 전원 3상 480VAC를 공급받아 3상 유도전압조정장치로 20VAC에서 480VAC 까지 전압조정을 하며 3상 유도전압조정장치의 개선책으로 3상 SCR제어를 사용하여 실험중에 있다. 3상 SCR제어는 3상 유도전압조정장치보다 가격이 저렴하고 공간-무게가 적으며 전압조정이 쉽고 입력전압변동에 대해 일정한 출력전압을 낼 수 있도록 장여가 가능하다는 장점을 갖고 있다.

현재는 3상 유도전압조정장치와 3상 SCR제어를 병행하여 시험중에 있으며 앞으로 200MW급 Modulator에서는 3상 SCR제어를 사용함에 예정이다. 3상 변압기는 송압용으로 Δ-Y 결선을 사용하고 있으며 약 66kW 용량을 갖는다. 사용중인 변압기는 3상 유도전압조정장치에 맞게 설계되어 있으나, 3상 SCR용 변압기를 설계하여 사용함에 예정이다.

정류기는 일반 정류용 다이오드(역첨두전압 1.6kV, 평균전류 16A: 96개 직렬) 6세트를 사용하여 3상 정류를 하고 있으며, LC 필터는 5H의 리액터와 14μF의 커패시터를 사용하고 있다.

3.2 충전부

충전부는 공진충전방식을 사용하고 있으며, 충전용 인덕터, 다이오드, Despiking 인덕터, PFN(Pulse Forming Network) 커패시터, De-Q'ing으로 구성된다.

충전용 인덕터는 약 2.4H를 갖으며 PFN 커패시터에 공진 충전이 될 수 있도록 설계되어 있다. 인덕터의 2차측에는 PFN 커패시터에 충전되는 전압을 일정하게 하기 위하여 De-Q'ing회로가 첨부되어 있다. 충전용 다이오드(1.6kV, 40A: 72개 직렬, 스노버: 330kΩ, 2.2nF)는 2배로 충전된 후에 역으로 흐르는 것을 방지하기 위해 설치되어 있으며, Despiking 인덕터는 방전시 일어나는 노이즈를 억제해 주기 위해 14mH의 인덕터와 2kΩ의 저항을 병렬로 연결하였다. PFN 커패시터는 그림 1에 나타낸 것과 같이 20개의 커패시터를 병렬로 연결하였으며 총 0.88μF를 갖는다.

충전시간을 T_c , PFN 전압을 V_{PFN} 이라 하면,

$$T_c = \frac{\pi}{\omega_c} = \frac{\pi \sqrt{L_c C_{PFN}}}{\omega_c}$$

$$V_{PFN} = V_{DC}(1 - \cos \omega t)$$

ω_c = Resonant charging frequency
 L_c = Inductance of the charging inductor
 C_{PFN} = Total PFN capacitance
 V_{DC} = DC Power supply voltage

이다.

PFN 커패시터에 충전되는 전압의 변동률을 $\pm 0.5\%$ 로 제한하기 위해 De-Q'ing 회로를 첨가 하였다. De-Q'ing 회로는 충전용 인덕터의 2차측에 1:25의 비율로 기준전압보다 높은 전압을 제거하는 역할을 하고 있다. De-Q'ing회로는 PFN에 충전되는 최대 전압의 2x에서 5x까지 조정이 가능하며 스위치용 SCR, 저항과 커패시터로 회로가 구성이 된다. 그림 2는 De-Q'ing 과 PFN 충전전압의 전형적인 파형이다.

3.3 방전부

방전부는 커패시터와 가변 인덕터로 구성된 PFN, Thyatron스위치 튜브, EDLC(End of line Clipper), 펄스 변압기와 2차측에 부하로 사용하는 Klystron으로 구성된다.

PFN은 3.730의 임피던스를 갖으며 펄스 변압기의 1차측에서 본 부하 임피던스와 같도록 결정한다. PFN의 임피던스를 Z_{PFN} 이라하면,

$$Z_{PFN} = \sqrt{\frac{L_{PFN}}{C_{PFN}}}$$

L_{PFN} = Total PFN inductance
 C_{PFN} = Total PFN capacitance

이다.

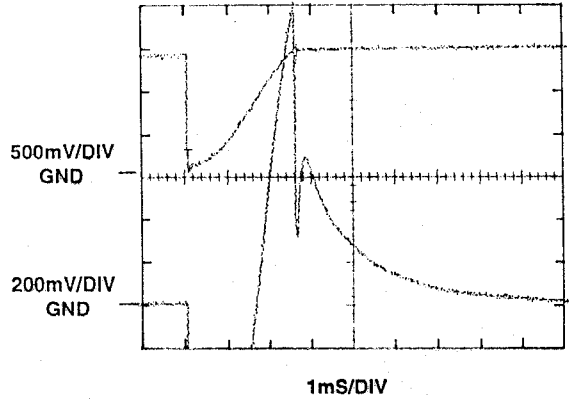


그림 2 PFN 충전 전압 (~7.9kV)과 공진 충전 인덕터의 2차 전압 (~140V)
 Fig 2 PFN Charging Voltage (~7.9kV) and Voltage Across Resonant Charging Inductor Secondary (~140V)

위 식에 의하여 L_{PFN} 의 값을 결정할 수 있으며, 따라서 등가 펄스폭을 τ 라 하면,

$$\tau = 2 \sqrt{L_{PFN} C_{PFN}}$$

에 의하여 6.56μs를 얻을 수 있다. 상승시간은 약 0.8μs가 되고 Flat-top 펄스폭은 약 3.5μs를 갖는다.

PFN은 L, C 10세트를 병렬로 연결한 형태로 계산한 값은 각각 2.45μH, 0.044μF를 갖는다. PFN의 각 인덕터는 약 4.5μH를 갖으며 인덕터값을 변화시킬 수 있으며 펄스의 Flat-top을 결정한다.

Thyatron 스위칭 튜브는 ITT F-241 튜브를 사용하고 있으며 PFN 커패시터에 충전된 전압을 방전시키는 스위치로 커패시터의 전압을 펄스 변압기에 전달하여 원하는 펄스를 얻는다. 표 2는 Thyatron의 사양을 나타낸다.

펄스 변압기는 1:15의 비율로 2차측에 8400의 Klystron 부하를 갖으며 Klystron은 SLAC 5045 튜브를 사용하고 있다. 펄스 변압기의 2차는 350kV, 400A의 펄스를 갖는다.

그리고 EDLC는 PFN 커패시터의 끝단에 연결하는 것으로 PFN 임피던스와 펄스 변압기의 임피던스가 맞지 않을 경우 Thyatron 튜브와 PFN 커패시터에 미치는 영향을 제거해 주기 위한 소자로서 다이오드(역첨두전압 1.6kV, 평균전류 40A: 72개 직렬)와 물저항(~40Ω)으로 회로가 구성이 되어 있고, 앞으로 물저항 대신 부성저항 특성을 갖는 Thyrite(250VDC, 10W: 24 직, 병렬)와 무유도 저항을 직렬로 구성할 것이다.

표 2 ITT F-241 Thyatron 사양
 Table 2 ITT F-241 Thyatron Specifications

Max. Peak Power (MW)	125
Max. Average Power (kW)	200
Max. Peak Anode V, Forward (kV)	50
Max. Average Anode Current (A)	10
Max. Peak Anode Current (kA)	8
Max. RMS Anode Current (A)	200
Max. Heating Factor (pb=epyxbxpr)	400x10 ⁹

3.4 임피던스 미스매치

Klystron 부하전류 I_k 는

$$I_k = k V_B^{3/2}$$

k = Pervance of the klystron load
 $= 2 \times 10^{-6}$ for SLAC 5045
 V_B = Beam voltage

펄스 변압기 1차 임피던스를 V_{LI} 이라 하면 다음과 같다.

$$V_{LI} = \frac{V_{PFN}}{Z_L + Z_{PFN}} Z_L$$

$$= \frac{V_{PFN}}{1 + n^5/2kV_{LI}^{1/2}}$$

Z_L : Load impedance at transformer primary
 n : Turn ratio of pulse transformer
 Z_{PFN} : PFN Impedance
 V_{PFN} : PFN Charging voltage

임피던스 미스매치는 PFN의 임피던스값이 펄스 변압기의 임피던스 값보다 커질때 발생한다. 첫번째로 반사된 전압을 V_{R1} 이라 하면

$$V_{R1} = V_{LI} - \frac{2n^5/2kZ_{PFN}V_{LI}^{3/2}}{1 + n^5/2kZ_{PFN}V_{LI}^{1/2}}$$

가 된다.

임피던스 미스매치는 Thyatron 스위치가 동작 직후 회복시간에 영향을 주는 것으로 EOLC의 회로를 통하여 옴의 미스매치를 제거해 주는 역할을 함으로 PFN의 커패시터에 제 충전이 되기전까지 Thyatron 스위치가 오프 상태로 회복이 되어야 오동작이 일어나지 않는다.

3.5 시뮬레이션과 실험 결과

그림 3은 펄스 변압기 2차의 물저항 부하에 흐르는 전류를 측정 한 그래프이다. 부하전류는 0.1V/A의 Troidal C.T.를 사용하여 측정한 값을 얻었다. 따라서 한눈금당 50A이므로 전류의 첨두값은 ~245A이다.

그림 4 (a)는 펄스 변압기의 2차전압을 실험한 값이다. 전압측정은 13000:1의 커패시터 배분기를 사용하였으며 한눈금당 26kV로 첨두값은 ~200kV, 펄스폭은 6.2 μ S를 얻었다. 그림 4(b)는 펄스 변압기의 2차전압을 시뮬레이션한 그래프이다. 부하의 전압은 366kV, 펄스폭은 6.6 μ S를 얻었다.

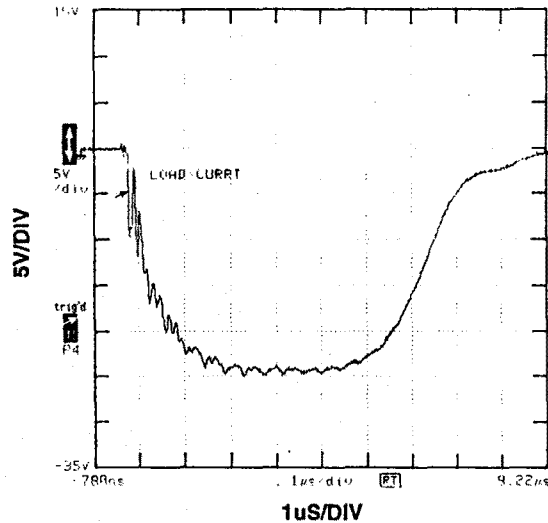
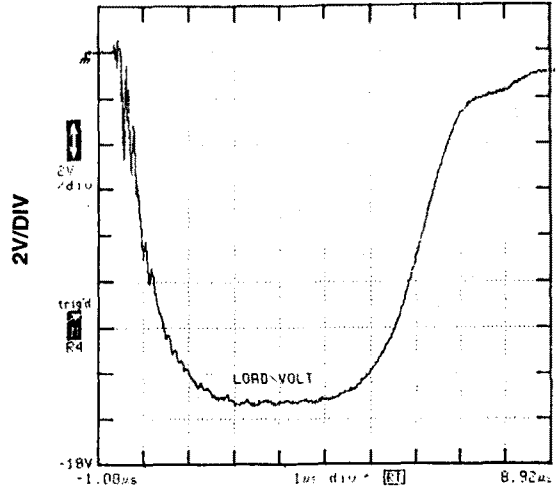
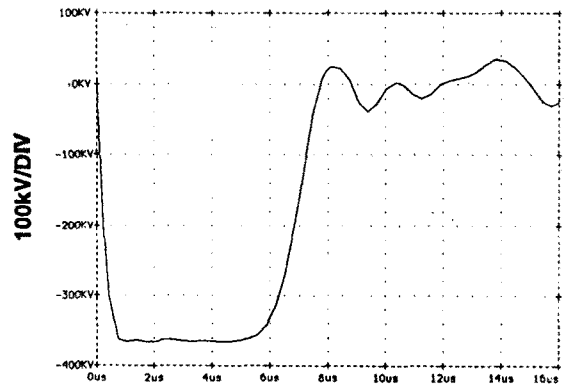


그림 3 물저항 부하에 흐르는 전류(실험) : ~245A Peak
 Fig 3 Current Through a Water Dummy Load(Experiment) : ~245A Peak



(a) 1uS/DIV



(b) 2 μ S/DIV

그림 4 (a)물저항 부하 전압(실험) : ~200kV Peak, 6.2 μ S FWHM
 (b)물저항 부하 전압(시뮬레이션) : ~366kV Peak, 6.6 μ S FWHM

Fig 4 (a) Voltage Across a Water Dummy Load(Experiment): ~200kV Peak, 6.2 μ S FWHM
 (b) Voltage Across a Water Dummy Load(Simulation): ~366kV Peak, 6.6 μ S FWHM

4. 결 론

본 논문은 150MW 시제품 Modulator로서 현재 최고 출력 110MW까지 시험을 하였다. 현재 제작된 Modulator에 연결할 실제 Klystron Tube의 장착을 준비중이며 기계품 시험이 수행된 시제품의 회로를 보완하여 200MW급 Modulator의 제작이 진행중이다. 앞으로 펄스 램프 제작이 완료되고 Klystron SLAC 5045와 Triaxial 펄스용 전선이 준비되는 대로 정격출력 150MW 시험이 시행될 예정이다.

5. 참고 문헌

- (1) R.B. Neal, ed, *The Stanford Two-Mile Accelerator*, Q.A. Benjamin, New York, 1968.
- (2) T. Shidara et al., "Klystron Modulator for the KEK 2.5GeV Linac," Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res., A279, 1989, pp 423-432.
- (3) P. Pearce, S. Hutchins, "Present Performance of the LEP Pre-Injector Klystron Modulators and the Impact of a Proposed Upgrade," IEEE Conf. Records of the 19th Power Modulator Symp., San Diego, CA., 1990, pp 124-129.