

## 200-MW 모듈레이터의 동작 특성 및 고조파 해석

박성수\*, 오종석, 조무현, 남궁원  
선형가속기 개발단, 포항가속기 연구소, 포항공과대학교

### Operation Characteristic and Harmonic Analysis of 200-MW Modulator

S.S.Park\*, J.S.Oh, M.H.Cho, W.Namkung  
Linac Division, Pohang Accelerator Laboratory, Pohang University of Science and Technology

#### Abstract

200-MW pulse modulators(total 11units) for the PLS linac employ the SCR phase control circuit. It controls 3-phase AC line voltage for the high-voltage DC power supply (DCPS, maximum of 25kVDC, 4.2A) which charges the pulse forming network(PFN). The PFN delivers 400kV, 500A, ESW 7.5μs pulse power to the 80-MW klystron amplifier tube. The SCR regulates 3-phase AC power and feeds to the high voltage transformer. Two different types of the transformer configurations, namely Δ-Δ and Δ-Y, are alternatively installed to 11 modulator units for the suppression of harmonic noises. RC filters and reactors are also installed. Currently, approximately 110-kW of average AC power per unit is consumed at the normal operation level of the modulator with 30pps. This paper presents the operational characteristics of the high power pulse modulator, especially the experimental results of the AC line harmonic components generated by the operation of the high power pulse modulator to suppress the switching noises from the SCR and rectifying diode arrays.

#### 1. 서 론

포항 가속기 연구소 선형가속기는 20GeV의 전자에너지를 얻기 위해서 최대 펄스출력 200-MW 모듈레이터와 80-MW급 클라이스트론 11대를 운전중에 있다. 200-MW 모듈레이터는 80-MW 클라이스트론 증폭기의 전원 공급장치로서 3상 480V를 트랜스퍼머로 승압하고 3상 전파정류기를 통하여 최대출력 25kV, 4.2A, 30pps의 직류를 얻는다. 직류 전환출력은 충전 인덕터와 PFN(Pulse Forming Network)의 커패시터로 구성된 공진 회로로 직류 출력전압의 2배에 이르는 공진 충전이 PFN에 이루어진다. 충전이 끝난 PFN은 대용량 싸이리트론 스위치에 의해 저장된 에너지를 부하인 클라이스트론에 펄스 트랜스퍼머를 통하여 전달한다. 200-MW 모듈레이터는 펄스폭 7.5μs (ESW)에 첨두 출력이 400kV, 500A이며 120pps의 운전조건으로 설계되어 있으며 PFN 임피던스는 ~2.8Ω로

표 1 200-MW 모듈레이터 사양  
Table 1 200-MW Modulator Speciecation

	Design Value	Operation Value
Peak Power (MW)	200	136.5
Average Power (kW)	200	28.7
Peak Output Voltage (kV)	400	350
Peak Output Current (A)	500	390
Equivalent Square Wave (μS)	7.5	7.5
Flat Top Pulse Width (μS)	4.5	4.5
Repetition Rate (Hz)	120	30
PFN(Pulse Forming Network)		
Impedance (Ω)	2.8	2.6

설계되어 있으며, 상기 시스템은 현재 350kV, 390A, 7.5μs (ESW), 30pps, Z<sub>PFN</sub> 2.6Ω로 운전되고 있다.

본 논문은 대용량 펄스 모듈레이터의 동작특성 측정결과와 아울러 SCR전압제어 및 3상 전파정류회로 사용시 발생하는 고조파의 분석 및 억를 개선회로에 대해 논 하고자 한다.

#### 2. 본 론

20GeV의 전자에너지를 얻기 위해서 운전중인 200-MW 모듈레이터는 80-MW 클라이스트론의 전원 공급 장치이다. 표 1과 그림 1은 200-MW 모듈레이터의 사양과 그림이다.

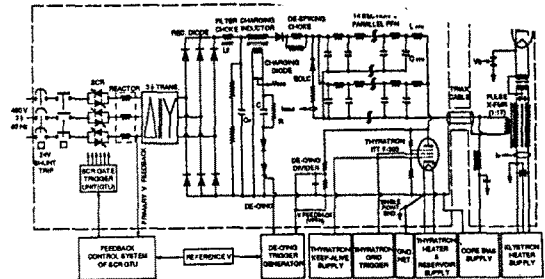


그림 1 200-MW 모듈레이터 회로.  
Fig. 1 200-MW Modulator circuit

#### 1) 직류 전원 공급 장치

200-MW 모듈레이터의 직류 전원공급장치는 그림 1 에서 보여준 것 같이 SCR 제어부, 3상 승압 트랜스퍼머, 3상 전파정류기, LC 필터로 구성되어 있다.

주 전원은 3상 6.6kV/480V, 1500kVA의 상위 3상 트랜스퍼머로 강압시켜서 200-MW 모듈레이터에 공급된다. 모듈레이터에 공급된 3상 480V 전원은 주 쉐킷브레이커를 통하여 3상 SCR 제어기에 전달되며, 상전압 제어를 하는 SCR(1.6kV, 800A:SKET400/16E)은 20-480V까지 입력전압 변동에 관계없이 원하는 전압으로 조절할 수 있으며, SCR 제어시 발생하는 고조파 및 노이즈는 회로에 첨가된 리액터와 RC 스노버를 사용하여 감소시켜준다.

SCR로부터 공급된 전압은 3상 승압 트랜스퍼머를 통하여 입력440V에 대해 19kVrms까지 승압되며, 승압 트랜스퍼머는 Δ-Y, Δ-Δ의 조합으로 각각의 모듈레이터에 사용하고 있다. 3상 승압 트랜스퍼머의 출력전압을 정류기(1.6kV, 26A, 48개 직렬) 6세트를 조합하여 만든 3상 전파정류기를 통하여 LC 필터(리액터: 5H, 25kV, 커패시터 : 14.1μF, 30kV)에서 최대 25kV, 4.2A, 30pps 직류 전력을 얻는다.

2) 충전 장치

충전장치는 그림 1에 보인 것 같이 충전 인덕터, 충전 다이오드, 디스파이킹 인덕터, PFN 커패시터, De-Q'ing 회로로 구성된다. 충전장치는 직류 전원공급장치로부터 25kV의 직류전압을 공급받아 충전 인덕터(2.4H, 12.46A)와 PFN 커패시터(0.05μF, 50kV, 28개 직렬)에 의하여 직류전압의 2배로 PFN 커패시터에 공진 충전시키는 방식으로 충전 인덕터와 PFN 커패시터 중간에 역방전현상을 막아주는 충전용 다이오드(1.6kV, 71A, 80개 직렬, 스노버:300kΩ, 100Ω, 0.01μF)를 사용하고 있으며 PFN 충전전압과 충전시간은 다음과 같이 표현된다.

$$T_C = \frac{\pi}{\omega_c} = \pi\sqrt{L_C C_{PFN}}$$

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

단,  $\omega_c$  : 공진 충전 주파수,  $L_C$  : 충전 인덕터  $C_{PFN}$  : 총 PFN 커패시턴스,  $V_{DC}$  : 직류 전압

디스파이킹 인덕터(14mH, 4kΩ저항, 병렬)는 방전시 스위칭 작용으로 발생하는 노이즈가 직류 전원부로 흘러 들어가는 것을 막아주는 소자로서 충전 다이오드와 PFN 커패시터 사이에 위치한 다. 공진충전시 직류 전원전압의 맥동 및 교류전원의 변동으로 인한 불규칙적인 충전을 일정한 전압으로 충전시킬 수 있게하는 De-Q'ing회로를 첨가하고있다. De-Q'ing회로는 충전 인덕터의 2차측에 25:1의 비율로 강압된 전압을 SCR(1.9kV, 410A) 스위치를 통하여 RC(3.6Ω, 50μF) 병렬회로로 구성된 부하에 연결되어 있다. 이 회로는 충전전압과 기준전압을 비교하여 기준전압 이상의 값 즉 충전 전압의 최대 5%를 De-Q'ing회로로 소비되도록 SCR 스위칭을 하여 PFN 커패시터에 충전되는 전압이 항상 일정하게 제어하는 역할을 한다.<sup>(1)</sup>

3) 방전 장치

방전 장치는 PFN(Pulse Forming Network), 트라이악셀 케이플, 펄스 트랜스퍼머, 클라이스트론, 사이라트론, EOLC(End of Line Clipper)로 구성되며 그림 1에 보인다. 충전장치로부터 PFN 커패시터에 최대 50kV로 충전된 전압은 사이라트론 스위치(ITT F-303)에 트리거 펄스를 인가함으로써 펄스 트랜스퍼머를 통하여 방전하는 장치이다.

PFN 임피던스는 펄스 트랜스퍼머의 부하로 사용하고 있는 클라이스트론 임피던스에 의하여 결정되며 인덕터(4.5μH가변)와 커패시터(0.05μF, 50kV) 28개가 직.병렬 조합으로 구성되며 PFN 임피던스는 다음과 같은 식으로 주어진다.

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

단,  $L_{PFN}$ ,  $C_{PFN}$ 은 PFN의 총 인덕턴스, 커패시턴스이다. 위식에 근거하여 방전시 발생하는 펄스 폭을  $\tau$ 라 하면

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

이다. 사이라트론은 최대전압 50kV, 최대전류 15kA의 진공관형 스위치 튜브로서 트리거 펄스를 인가함으로써 Turn On 상태가 되며 역전압을 걸어 줌으로써 Turn Off 상태로 된다. 펄스 트랜스퍼머는 부하로 사용되는 클라이스트론에 펄스전압을 전달하는 것으로써 변압비는 1:17로서 2차 최대전압은 400kV, 최대전류는 500A를 갖는다. 그리고 EOLC는 PFN에 병렬로 연결되어 PFN 임피던스와 부하의 임피던스가 맞지 않을 경우 역으로 걸리는 전압을 제한하는 장치로서 전압에 따라 가변되는 저항성분을 갖는 사이라이트, 저항(2.5Ω, 200W) 및 다이오드(1.6kV, 71A, 80개 직렬, 스노버 300kΩ, 100Ω, 0.01μF)로 구성된다.

클라이스트론은 마이크로웨이브를 증폭시키는 튜브로서 그 임피던스는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$i_k = k \times V_B^{\frac{3}{2}}$$

단,  $i_k$ 는 클라이스트론 부하전류,  $V_B$ 는 클라이스트론 부하 전압,  $k$ 는 클라이스트론 부하의 Perveance( $2.0 \times 10^{-6}$ :TOSHIBA E-3712)이다.

4) 고조파 분석 및 대책

포항 가속기 연구소 선형가속기에서 2GeV의 전자에너지를 얻기 위하여 전원공급장치로 사용하는 200MW 모듈레이터 11대를 운전중에있다. 운전중인 11대의 모듈레이터는 3상 480V전원을 제어하기 위하여 SCR 전압제어방식을 사용하였으며, 직류전압을 얻기 위하여 사용한 3상 전파정류회로를 사용하고있다. 따라서 위상제어 및 3상 전파정류시 발생하는 고조파 및 스위칭 노이즈는 주변기기들에 악 영향을 미칠 수 있으므로 고조파분석을 하였다.

우선 11대의 모듈레이터에서 발생하는 저차 고조파성분을 줄이기 위하여 SCR 출력선에 리액터(1mH)를 사용하였으며, 3상 정류 트랜스퍼머의 결선을 Δ-Y, Δ-Δ를 번갈아 가며 사용하였다. 각 모듈레이터에서 발생하는 총 고조파 함유율은 Δ-Y결선을 사용하였을 경우 24.87%, Δ-Δ결선을 사용하였을 경우 26.5%, 1VR를 사용하였을 경우 17.85% 갖는다. 6.6kV/480V, 1500kVA 상위 변압기 2대를 사용하여 각각 7대의 모듈레이터에 교류전원을 공급하고 있으며 상위 변압기의 저전압부분에서 측정된 총 전류 고조파 성분은 21.74%이며 전력공급단선도는 그림 2에 보인바와 같다.

현재 상위 변압기 고전압 부분에서 저차 고조파성분을 제거하기 위하여 LC 필터를 사용하였으며 그림 2에 개략도를 보인다. LC 필터는 다음과 같은 식으로 필터가 설계되었다.

$$C_c = \frac{P_{av} \times 10^9}{2\pi f E^2} [\mu F]$$

$$L_c = \frac{1}{(2\pi f)^2} \times \frac{1}{n^2} \times \frac{1}{C_c} [\mu H]$$

단,  $P_{av}$  : 보상 전력(kVA),  $C_c$  : 보상 커패시턴스(μF),  $L_c$  : 보상 인덕턴스(μH),  $f$  : 주파수(Hz),  $E$  : 선간 전압,  $n$  : 고조파 차수 이다.

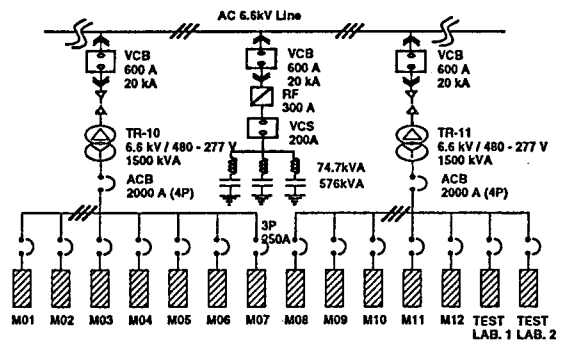


그림 2 3상 480V 전력 회로

Fig. 2 3-phase 480V AC Power Single Line Diagram

스위칭 할 때 발생하는 노이즈 제거용으로 RC 스노버를 사용하고 있으며 다음과 같은 식으로 나타낸다.

$$L_s' = \frac{\sqrt{3}V'}{2\pi f_1}, \quad C_s' = [(2\pi f_1)^2 L_s']^{-1}$$

$$C'' = [(2\pi f_1)^2 L_s'']^{-1}, \quad C_s = [(2\pi f_0)^2 L_s']^{-1}$$

단,  $L_s'$  : 트랜스퍼머의 등가 인덕턴스,  $I_0$  : 1차측 전원 전류,  $V'$  : 1차측 선간 전압,  $f$  : 주파수,  $C_s$  : 1차 스노버 커패시터,  $C''$  : 2차 스노버 커패시터,  $L_s''$  : 트랜스퍼머의 등가 누설 인덕턴스,  $C_s$  : 등가 커패시턴스,  $f_1$  : 설계된 공명 주파수,  $f_0$  : 상용 주파수 이다.

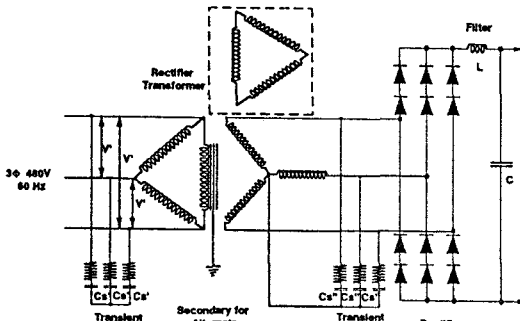


그림 3 직류 전원 공급 회로  
Fig. 3 DC Power supply circuit

#### 4. 실험 결과

200-MW 모듈레이터는 350kV, 390A, PFN 임피던스 2.6Ω로 운전되고 있으며 펄스 트랜스퍼머 2차측 전압·전류와 클라이스트론의 RF 출력 파형을 그림 4에 보인다.

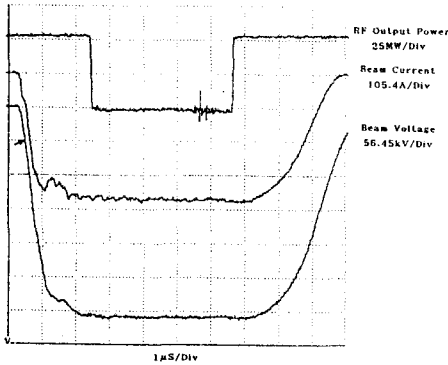


그림 4 200-MW 모듈레이터의 빔전압, 빔전류와 RF 출력 파형.  
Fig. 4 Beam Voltage, Beam current, and RF output waveform of 200-MW modulator.

200-MW 모듈레이터의 양호한 빔 전압을 얻기 위하여 SCR 제어 및 De-Q'ing 회로를 첨가하였으며 안정도는 그림 5에 보인 것과 같다.

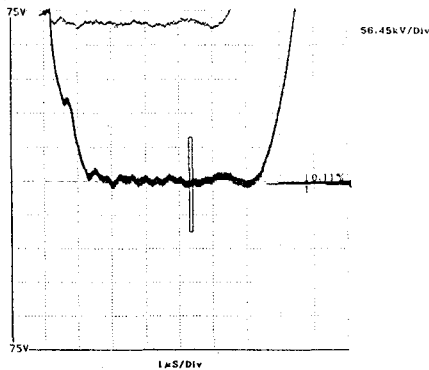


그림 5 빔 전압의 안정도  
Fig. 5 Beam voltage stability

200-MW 모듈레이터 전원은 상위 트랜스퍼머로 부터 공급되며, 모듈레이터의 운전조건이 340kV, 380A, 30pps일때 상위 트랜스퍼머의 2차측에서 측정된 전류 고조파는 그림 6에 나타난 것같이 총 전류 고조파성분은 21.74%이다.

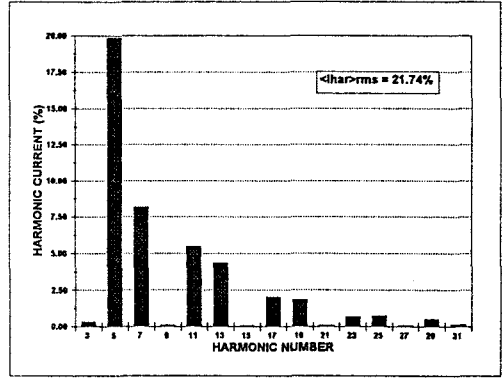


그림 6 상위 트랜스퍼머 2차측 전류 고조파  
Fig. 6 Current harmonic of upper transformer secondary side

200-MW 모듈레이터를 340kV, 380A, 30pps로 운전할 때 3상 정류 트랜스퍼머의 Δ-Y, Δ-Δ의 결선과 IVR를 사용한 경우 총 전류 고조파 성분은 각각 26.5%, 24.87%, 17.85%이며 그림 7에 보인다.

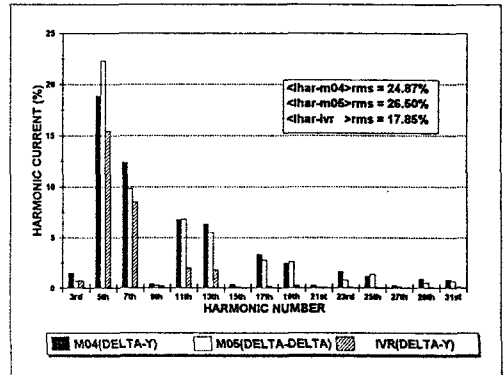


그림 7 3상 정류 트랜스퍼머의 Δ-Y, Δ-Δ 결선 및 IVR를 사용한 경우의 전류고조파.  
Fig. 7 AC Line Current Harmonics Δ-Y, Δ-Δ Types of the Transformer and used IVR.

#### 4. 결론

본 논문은 200-MW 모듈레이터의 동작특성 및 고조파 해석을 하였다. 현재 200-MW 모듈레이터의 운전 상태는 350kV, 390A, 30pps로 운전하고 있으며 전압 변동율이 ±0.11%로 양호한 빔 전압을 얻었다.

그리고 각 모듈레이터에서 발생하는 고조파 및 노이즈는 리액터와 RC 스노버 회로를 첨가함으로써 1차로 보상을 하였으며 최종적으로 상위 트랜스퍼머 1차 6600V에서 LC 필터를 사용하여 저차 고조파를 제거해 줌으로서 역률이 0.9이상으로 보상된 상태로 전 시스템이 가동되고 있다.

#### 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. G. N. Glasoe and J. V. Lebacqz, Pulse Generators, McGraw-Hill, 1948, Chapter 6.
4. S. H. Nam et al., "Prototype Pulse Modulator for High-Power Klystron in PLS Linac, " Proceed., IEEE, the 20th Power Modulator Symp., New York, 1992, pp 96-99.