

포항 20억 전자볼트 선형가속기 클라이스트론-모듈레이터 시스템의 성능
박 상욱*, 박 성수, 이 경태, 오 종석, 조 무현, 남궁 원
포항 가속기 연구소, 포항 공과 대학교

KLYSTRON-MODULATOR SYSTEM PERFORMANCES FOR PLS 2-GeV LINAC

S.W. Park*, S.S. Park, K.T. Lee, J.S. Oh, M.H. Cho, and W. Namkung
Pohang Accelerator Laboratory, POSTECH
Pohang 790-784, Korea

ABSTRACT

The PLS 2-GeV linac employs 11 units of high-power pulsed klystrons (80MW) as the main RF sources. The matching modulators of 200 MW (400kV, 500 A) can provide a flat-top pulse width of 4.4 μ s with a maximum pulse repetition rate of 120 Hz at the full power level. For a good stability of electron beams, the pulse-to-pulse flat-top voltage variation of a modulator requires less than 0.5%. In order to achieve this goal, we stabilized high voltage charging power supplies within 1% by a phase controlled SCR voltage regulator. In addition, we employed ac/dc feedback together with a resistive De-Q'ing system to achieve far less than 0.5% variation of the PFN charging voltage. This paper presents the main feature of the klystron-modulator system and the characteristics of the pulsed high-power RF system performance during the beam injection operation for the Pohang Light Source commissioning.

본 논문에서는 1994년 9월에서 1995년 3월까지의 약 9개월 기간 안에 일어났던 각종 비정상적인 동작 상태 및 문제점에 대한 분석을 통하여, 고효율 K&M 시스템의 전반적인 동작 성능을 살펴 보고자 한다. 참고로 산정 기간은 연말 연시의 휴지 기간을 제외한 198일을 표본으로 채택함을 밝힌다.

II. K&M 시스템의 사양 및 성능

K&M 시스템의 주요 구성은 입력 3상 교류 전원을 제어하는 SCR, 원하는 펄스 폭을 만드는 PFN(Pulse Forming Network), PFN 전압 안정화 장치인 De-Q'ing, EOLC(end of line clipper), 1:17 승압 펄스 변압기 및 대출력 스위칭 소자인 싸이클로트론 튜브로 이루어진다. K&M 시스템의 주요 운전 파라미터들은 표 1.과 같다.

표 1. K&M 시스템의 주요 운전 파라미터

Peak beam power	200-MW max.(400kV@500A)
Beam vol. pulse width	ESW 7.5 μ s,4.4 μ s flat-top
Pulse rep.rate	120 pps max.(currently 30pps)
PFN impedance	2.64 Ω (5%positive mismatch)
Voltage stabilization	SCR,DC feedback & 5%De-Q'ing
Pulse transformer	1:17(turn ratio),L _{pk} :1.3 μ H,Cst:69nF
Thyratron switch	Heating factor:46.8 \times 10 ⁶ 8.5 kA peak anode current
Klystron tube	Drive power:~300W, efficiency:40%,gain:~53dB, peak power:80/65MW (currently running at 50to65MW)

I. 서 론

포항 선형 가속기는 20억 전자볼트의 빔을 1994년 9월 이후로 계속 저장 링(SR)에 주입하고 있다[1]. 총 11대 분량의 선형 가속기 클라이스트론-모듈레이터(K&M) 시스템은 저장 링에 저장을 시작하기 이전부터 가동되어, 현재 14,000여 시간의 고압 운전 경험을 축적하였다[2]. K&M 시스템의 대략적인 개념도는 그림 1. 과 같이 나타내어진다.

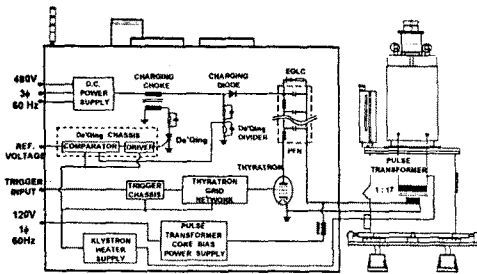


그림 1. K&M 시스템의 개념도

빔 전압의 안정화는 (1)SCR의 feedback 회로에 의한 제어와 (2)De-Q'ing에 의해서 이루어진다. SCR AC/DC feedback 회로는 전압 제어 오차를 $\leq \pm 0.5\%$, De-Q'ing 회로는 빔 전압 불안정도 $\leq \pm 0.1\%$ 를 만족시킨다. 그림 2.는 오실로스코프를 사용하여 1시간 이상 누적한 빔 전압 변동률 파형으로 $\leq \pm 0.1\%$ 의 빔 전압 변동률을 보여주고 있다.

K&M 시스템의 중요 구성 요소중, 대출력 싸이클로트론

튜브는 계속적인 보수와 조정 및 세심한 주의를 필요로 하는 중요한 소자중의 하나이다. 현재 포함 선형 가속기 K&M 시스템에서는 ITT/F-303 과 Litton/L-4888 등 두 가지 형태의 싸이라트론 튜브를 사용하고 있으며, EEV/CX-1836A 튜브도 사용할 예정으로 되어 있다. 표 2. 는 이들 세가지 튜브의 비교표 이다.

K&M 시스템에는 설비 및 운전자의 안전을 위한 interlock 시스템이 설치 되어 있는데, 이들은 릴레이 접점을 이용한 static interlock 과 전자 회로를 이용하여 static 보다 상대적으로 응답 속도가 빠른 dynamic interlock 으로 분리 되어 있다. 운전시 static interlock 이 발생하면 자동 또는 수동으로 interlock을 해제 시킬 수 있는데, 현재는 시스템에서 일어나는 모든 상황을 관찰 및 기록할 수 있도록 수동으로 설정 되어 있다. dynamic interlock 은 interlock 발생 후, 정상 상태로 interlock 레벨이 떨어지면 자동으로 해제되며 현재, 시스템의 진공도와 연동토록 되어 있다.

표 2. 싸이라트론 튜브 비교표

ITEM	ITT F-303	Litton L-4888	EEV CX-1836
Heater(Vac/A)max	6.6/80	6.7/90	6.6/90
Reservoir(Vdc/A)max	6.0/20	5.5/40	6.6/7
Peak anode(kv/kA)forward	50/15	50/10	50/10
Peak anode vol.(kv)inverse	50	n/c	50
Avg.anode cur.(A)max	8	8	10
minDC anode vol.(kv)	2	10	5
Heating factor($\times 10^4$)max	300	400	n/c
dt/di(kA/ μ s)max	50	16	10
Anode delay(μ s)max	0.3	0.4	0.35
Trigger jitter(ns)max	2	10	10

III. 시스템 통계 분석

포함 20억 전자 볼트 선형 가속기가 1993년 12월 완공된 이후로, K&M 시스템은 하절기 휴지 및 단 기간적인 휴지를 제외 하고, 계속적으로 운전 되어져 왔다.

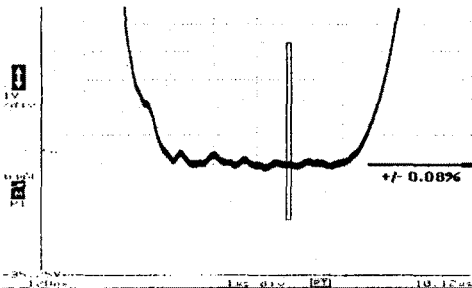


그림 2. 클라이스트론 빔 전압 변동률 측정 곡선

표 3.은 클라이스트론, 싸이라트론의 총 가동 시간 및 모듈레이터의 총 고 전압 운전 시간을 나타내고 있다. 그림 3.은 1994년 9월 부터 1995년 3월 사이에 발생한 모든 static interlock을 표현한 Pareto chart [3] 이다. 산정 기간은 앞에서 서술한 바와 같이 198일이며, 주말과 업무 시간 이후의 유지 보수는 포함 되어 있지 않다. chart에 나타나듯, 주 회로 차단기(①(CB)) trip에 따른 운전 정지 시간이 다른 어떤 interlock보다 월등히 높다는 것을 알 수 있다. 나머지 static interlock중 fan(③)과 key switch(⑥)는 고장난 소자의 교환 시간을 나타내는 것으로 소자의 life time에 연관 되어 있다.

표 3. K&M 시스템 운전 시간 (6.21.95 현재)

Unit No.	H. V. run time	Kly. heater	Thyratron
MK-01	12,881	14,899	15,102
MK-02	14,460	14,560	14,716
MK-03	14,127	14,839	16,927
MK-04	13,246	14,769	15,004
MK-05	12,597	14,182	14,678
MK-06	12,576	13,728	4,598(*1)
MK-07	11,442	12,919	13,710
MK-08	12,403	13,739	13,652
MK-09	11,333	12,783	13,194
MK-10	11,180	12,602	9,221(*2)
MK-11	11,310	12,715	6,372(*1)

*1)Thyratrons replaced with L-4888 due to the failure of F-303.

*2)Thyratrons replaced with F-241 due to infant failure of F-303.

포함 K&M 시스템의 성능 및 안정도를 수치로 환산하여 그 결과를 SLAC 시스템 수치와 비교표를 작성한 것이 표 4. 이다. 표에서

◎ MTBF (Mean Time between Failures)

$$= \frac{[\text{모듈레이터 댓수}(N) \times \text{총 운전시간}(TO)]}{\text{총 interlock갯수}(FC)}$$

◎ MTTR (Mean Time to Repair)

$$= \frac{\text{총 운전 정지시간}(TD)}{\text{총 interlock 갯수}(FC)}$$

◎ A (System Availability) = $1 - \text{MTTR} \times \text{FC} \div TO$

로 정의되어 있다. 표에 나타나 있듯이 시스템의 성능 및 안정도를 나타내는 A는 8hr./day 빔 운전 모드에서 71%, 24hr./day 빔 운전 모드에서 90% 이상의 시스템 안정도를 각각 얻었다. 대부분의 interlock은 시스템 안정도에 크게 영향을 끼치지 않는 interlock으로 간단히 해결되어 있다.

그림 3. 은 각종 static interlock을 통계적으로 분석하여 도표로 나타낸 Pareto chart이다. chart의 막대 그래프는 interlock별 총 발생한 수를 나타내며 원 좌표는 interlock 으로 인하여 운전 정지된 시간을 나타낸다.

표 4. K&M 시스템 성능 수치 비교표

ITEM	PLS ^{*)}	SLAC ^(**)
Number of modulators, N	11	243
Spare no. of modulators	0	14
Operation time(hr) ^(**) , TO	4752	4000
Total failure counts, FC	168	997
Total down time(hr), TD	493(1150)	401
MTBF(hr)	311	975
MTTR(hr/failure count)	2.6(6.8)	0.4
System Availability, A	0.91(0.71)	0.94 ^(**)

*1) Operation time for the statistical analysis.

*2) Number in () indicates the standby RF operation mode without extended hour maintenance work(only 44hr/week).

*3) Standby spare unit included

Pareto chart에서 나타나듯 시스템의 안정도 A에 가장 중요한 영향을 미치는 것은 CB(circuit breaker) Trip 이다. CB Trip이 발생하는 가장 주된 요인은 싸이라트론에 있다. 표 2. 에서 와 같이 여러 가지 세밀한 최적 운전 조건이 만족되어 저야만 싸이라트론 튜브는 정상적으로 작동을 한다.

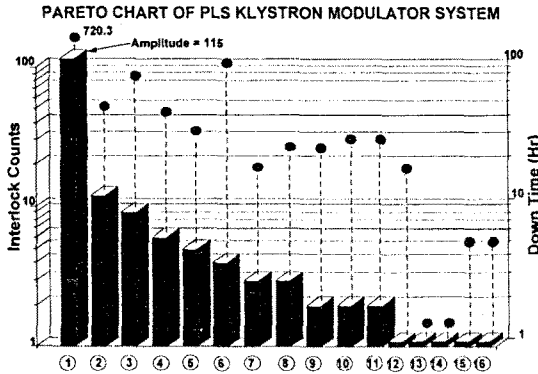


그림 3. static interlock에 따른 Pareto chart

- (1) CB trip, (2) Klystron vacuum, (3) Cooling Fan, (4) Thyatron grid circuit, (5) Core bias current low, (6) Key switch, (7) DCPS overvoltage, (8) Magnet current low, (9) Core bias current high, (10) SCR gate hold, (11) Ground hook, (12) Magnet temperature high, (13) Thyatron heater, (14) PFN RC snubber, (15) SCR control board replace, (16) De-Q'ing current high.

F-303 이나 L-4888 tube를 장기간 연속 운전한 경험을 토대로 볼 때, 튜브의 최적 운전 조건은 시간적으로 불규칙하게 변화 하며 만약, 이 운전 조건을 재 조정 하지 않으면 self-fire, firing missing 현상이나 slow recovery 같은 불안정한 상태를 보여 CB Trip을 유발 시킨다.

CX-1836A tube는 F-303이나 L-4888보다 운전 조건이 까다롭지 않은 관계로, 곧 포항 K&M 시스템에 시험

운전할 예정이다.

클라이스트론 튜브 진공도에 관련된 interlock(그림 3. 의 ②)은 튜브 내부의 작은 아킹 현상으로 인한 일시적 인 진공도 저하 현상으로, 빈번하게 이러한 현상이 계속 되면 short pulse processing (1 μ s pulse width)을 통하여 정상화 시킬 수 있다.

나머지 static interlock들은 펄스 모듈레이터 내부 고압 소자의 접촉 면 저항 증가로 인한, 소자 간의 코로나 방전에서 야기 되어 지는 현상으로 지속적인 개선 이 요구 되는 사항 이다.

IV. 결 론

포항 20억 전자볼트 선형 가속기 K&M 시스템의 각종 운전 결과에 대한 Pareto chart를 작성, 분석한 결과 24시간 빔 운전 모드에서 시스템 안정도 91%라는 결과를 얻었다. 또한 시스템 안정도를 더욱 높이기 위해서 각종 static interlock의 원인을 분석 하여, 신뢰성 높은 K&M 시스템을 만들 수 있는 기초를 마련 했다.

V. 참고 문헌

- [1] W.Namkung, "PLS-2-GeV Linac," Proc. 1994 International Linac Conf., Tsukuba, Japan, Aug. 21-26, pp. 14-18 (1994).
- [2] M.H. Cho et. al, "High Power Microwave System for PLS 2-GeV Linac," Proc. 1994 International Linac Conf., Tsukuba, Japan, Aug. 21-26, pp. 418-420 (1994), M.H. Cho et. al, "Design of 200-MW Pulse Modulator for PLS-2-GeV Electron Linac," Proc. 3rd European Particle Accelerator Conf., Berlin, Germany, Vol.2, pp. 1591-1593 (1992).
- [3] A. R. Donaldson and J. R. Ashton, "SLAC Modulator Operation and Reliability in the SLAC Era, " IEEE Conf. Proc. 20th Power Modulator Symposium, pp. 152-156 (1992).