

포항 가속기연구소 에너지 3GeV 성능 향상을 위한 펄스 모듈레이터 설계

박성수, 김상희, 김성철, 황운하, 손윤규, 김승환, 박용정, 남상훈
 포항가속기연구소/포스텍

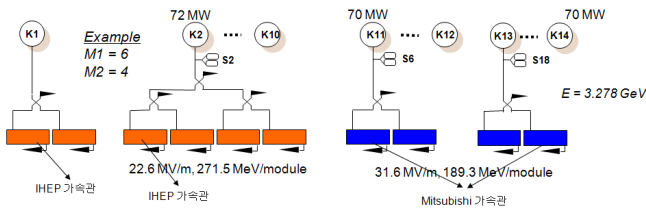
Modulator Design for 3 GeV Upgrade at PAL

Park Soung Soo, Kim Sang Hee, Kim Sung Chul, Hwang Woon Ha, Son Yoon Ku, Kim Sung Hwan, Park Young Jung, Nam Sang Hoon
 Pohang Accelerator Laboratory/POSTECH

Abstract - 선형가속기의 에너지를 3.0 GeV로 증강시키기 위하여 마이크로웨이브 증폭기의 펄스 전원을 설계하였다. 현재 클라이스트론-모듈레이터를 12set에서 2set를 추가로 증설할 예정이며 기존의 마이크로웨이브 모듈은 1개의 모듈이 4개의 가속관에 마이크로웨이브를 공급하고 있다. 현재 운전중인 12개의 가속 모듈중에 1개의 모듈을 각각 2개의 가속관으로 나누어서 2개에 모듈로 마이크로웨이브를 공급하고 나머지 9개의 모듈은 4개의 가속관에 마이크로웨이브를 공급할 예정이다. 선형가속기의 에너지 증강사업에서 200 MW의 펄스 모듈레이터와 80 MW의 클라이스트론 2set 새로운 방식으로 설치할 계획이며 기존의 모듈레이터 또한 성능향상을 할 예정이다. 본 논문에서는 마이크로웨이브 증강 방안 및 새로운 방식의 모듈레이터에 대한 설계에 대하여 발표하고자 한다.

1. 서 론

현재 운전중인 2.5 GeV의 선형가속기 injector를 3.0 GeV로 에너지 증강을 위한 성능향상 사업을 수행하는 목적은 더 향상된 전자빔과 Top-up 모드 운전을 하고자 하고 있다[1,2,3,4,5]. 전자를 가속하기 위하여 11set의 SLED를 사용하여 가속관에 RF를 인가하고 있으며 성능향상시 2set의 SLED가 추가될 예정이다. 또한 3 GeV upgrade를 위한 선형가속기의 RF 전력공급장치는 현재 운전중인 12 set의 클라이스트론-모듈레이터를 2set의 클라이스트론-모듈레이터를 추가하여 14 set의 클라이스트론-모듈레이터로 구성할 예정이며 80 MW용 Toshiba E3712 클라이스트론과 Inverter HVPS를 사용한 200 MW 모듈레이터를 사용하여 구성할 예정이다. 현재 클라이스트론의 평균 출력 전력은 약 55 MW로서 약 70 % 정도 사용을 하였으며 3 GeV 성능향상 운전 모드에서는 클라이스트론의 평균 출력이 약 70 MW 이상으로 약 90 %이상 인가 할 예정이다. 그림 1은 성능향상시 계획된 RF 모듈 증강 개략도를 보여주고 있다.



〈그림 2〉 3 GeV linac 에너지 증강방안

선형가속기의 주요 사양은 표 1에 나타내었다.

〈표 1〉 선형가속기 주요 사양

Description	Specification
Operating Frequency	2856 MHz for S-band
No. of Klystron	14 set
No. of Accelerating section	46 set (4x9 module + 2x5 module)
No. of SLED	13 set

전자를 가속하기 위하여 사용하는 클라이스트론은 도시바클라이스트론으로 주파수는 2.856 GHz이며 클라이스트론 개수는 14set, 가속관 개수는 46개, 에너지 배가장치(SLED)는 13개를 사용할 예정이다.

2. 본 론

2.1 고출력 RF 시스템

PLS-II 선형가속기는 14개의 고출력 클라이스트론 과 13개의 에너지 배가기인 SLED와 46개의 가속관으로 구성되어 있다. MK1, MK11, MK12, MK13, MK14는 5 모듈은 한 모듈이 클라이스트론 1개와 가속관 2개로 구성 된다. MK2에서 MK10 까지의 9모듈은 현재운용중인 구조와 같이 한 모듈당 클라이스트론 1개와 가속관 4개로 구성된다. 가속관은 현재 운용중인 44개에 2개를 추가하여 구성한다. RF 펄스폭을 압축하여 출력을 5배정도 증가 시켜 가속관에서 빔 에너지를 1.5배 증가시키는 목적으로 사용되는 SLED는 13개이다. SLED에 흐르는 냉각수는 45+/- 0.1°C 로 제어되어야 한다.

2.2 저출력 RF 시스템

PLS-II의 선형가속기 RF 시스템은 PLS 2.5GeV의 RF 시스템과 유사하다. RF 신호원은 2856MHz RF 발생기와 저전력 RF 단 그리고 600W RF 증폭기(SSA)로 구성되어 있다. 2856MHz RF 발생기의 주파수 안정도는 510⁻¹⁰/day 이며, 위상 잡음도는 10 kHz offset 에서 -137 dBc/Hz 이다. 저전력 RF 단은 전단 증폭기와 CW RF 증폭기 및 180도 위상반전기(PSK)로 구성되어 있다.PSK의 스위칭 시간은 50 ns보다 작아야 한다. 13개의 클라이스트론을 구동하기 위한 구형파 RF 전송선(MDL)은 145m의 1&5/8" 동축선이며 전송선의 입력은 120 kW이며, 각 클라이스트론으로 공급하기 위한 전송선내의 각 방향성 결합기의 출력은 2~3kW로 설계되어야 한다. 또한 MDL은 외부온도의 변화에 의한 기계적 팽창으로 인한 위상 변화를 최소화하기 위하여 45도 냉각수를 공급하고 그 위를 단열재로 포장하여야 한다.

각 클라이스트론의 구동 전력은 IPA 를 통하여 위상 및 전력제어를 조정한다. IPA는 RF단과 제어단으로 구성되어 있으며 RF단은 360 위상 조절이 가능하고 3kW의 출력을 견딜수 있는 rotary-field phase shifter 와 출력 조절 범위가 20 dB 인 strip-line variable attenuator 사용한다. IPA의 위상과 출력제어는 통신을 통하여 제어되어야 하며 주요 사양은 표 7-2에 나타내었다.

〈표 2〉 IPA 의 주요사양

Frequency Range	2856 0.1 MHz
Total Insertion Loss	< 3.0 dB
VSWR	< 1.2
Max. In/Out RF Power	3/1.5 kW Peak 4s 10-60 pps
Phase Shift Range	360°
Phase Error	< 3.0°
Variable Attenuation Range	20 dB Max.
Isolation	> 30 dB

2.3 고출력 클라이스트론 모듈레이터 시스템

3 GeV upgrade를 위한 선형가속기의 RF 전력공급장치는 현재 운전중인 12 set의 클라이스트론-모듈레이터를 2set의 클라이스트론-모듈레이터를 추가하여 14 set의 클라이스트론-모듈레이

터로 구성할 예정이며 80 MW용 Toshiba E3712 클라이스트론과 Inverter HVPS를 사용한 200 MW 모듈레이터를 사용하여 구성할 예정이다.

2.3.1 클라이스트론 튜브

S-band 클라이스트론은 80 MW Toshiba E-3712 클라이스트론을 사용할 예정이며 사양은 표 1과 같다. 표1에는 Toshiba 클라이스트론과 SLAC 5045 클라이스트론에 대한 사양도 함께 정리하였다. Toshiba E3712 클라이스트론은 입력 캐비티와 출력 캐비티를 포함하여 5개의 캐비티로 구성 되어있으며 2.0 μp 을 갖는 전자총으로 구성되어 있다. RF window는 2개를 사용하고 있으며 최대 RF 출력의 1/2를 감당하도록 되어 있으며 클라이스트론 내부와 외부의 진공 차단으로 사용하고 있다. 2개의 클라이스트론 RF 출력은 Power Combiner로 RF를 더하여 도파관을 통해서 전자 가속관에 전달된다. 클라이스트론의 빔을 집중하기 위하여 Electromagnetic field를 사용하고 있으며 클라이스트론 캐비티의 외부에 설치되어 있다. 최대 magnetic field의 세기는 약 1.2 kG 이다.

클라이스트론의 전자총은 지름이 8.9 cm 캐소드와 최대 전류 밀도가 8 A/cm²이다. 음극과 양극의 전기력의 세기는 약 200 kV/cm 이며 펄스 트랜스퍼머를 사용하여 펄스를 공급받으며 절연유 탱크에 놓이게 된다. 전자빔에 의하여 발생하는 X-ray를 차단하기 위하여 클라이스트론 콜렉터 주위에 납으로 차폐하였으며 전자총 주위에도 납으로 차폐를 하였다.

<표 2> S-band 클라이스트론의 사양

Description	Unit	Toshiba	SLAC 5045
Frequency	MHz	2,856	2,856
Pulse-width	μs	4	3.5
Beam Voltage	kV	400	350
Beam Current	A	500	420
Repetition Rate	Hz Max.	60	180
β -perveance		2.0	2.0
RF Output Power	MW	84	60
Drive Power	W Max.	500	600
Gain	dB Max.	53	49
Efficiency	%	43	40
Focusing		Electro	Electro
Filament Voltage	Vac	90 - 110	120 - 170
Filament Current	Aac	4.5 - 5.5	2.6 - 3.6
Klystron flow	l/min.	50	75
Magnet flow	l/min	5	
Cooling inlet Temp.	$^{\circ}\text{C}$	40	35
Cooling inlet Pressure	kgf/cm ²	10	120

클라이스트론을 운전하는 동안에 내부의 진공도, 냉각장치의 흐름도 및 온도, 콜렉터 히터 전력, 전자력, 절연유 레벨을 유지하는 것이 중요하며 다음과 같은 경우에는 보호용 인터록 신호를 처리해서 모듈레이터를 Turn off 함으로서 클라이스트론을 보호해야 한다.

- 캐소드의 과전압과 과전류
- 히터의 과전압과 과전류
- Magnet Power Supply의 Fault
- Cooling Water System의 Fault
- Vacuum의 기준 레벨 이상으로 증가한 경우(1×10^{-7} torr)
- RF Power의 반사파가 너무 클 경우

2.3.2. 모듈레이터

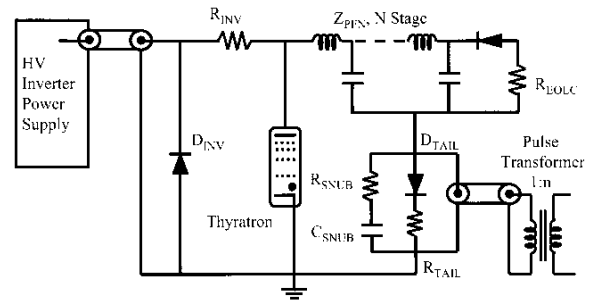
3 GeV 성능향상에서 요구되고 있는 에너지의 안정화는 모듈레이터의 빔 전압이 rms 0.1 %까지 요구되고 있다. 여기에 충족하는 상용고전압 인버터 충전 방식으로 사용하여 PFN 커패시터에 고전압을 인가하고 커패시터에 충전되어 있는 에너지를 방전 후 Dead Time 영역을 두어서 싸이라트론이 충분히 방전한 후 충전하는 방식을 사용할 수 있으며 필요한 전압까지 충전한 후 고전압이 안정된 영역을 확보한 최소의 시간으로 충전시간을 유지시

킴으로서 싸이라트론의 자가 방전의 기회를 최소화 할 수 있다. 그리고 현재 사용중인 모듈레이터의 충전부분을 고전압 인버터 전원공급기로 설계함으로써 기존의 전압 제어 방식보다 전압 변동율이 적고 시스템을 소형화 할 수 있으며 더 높은 신뢰성을 얻을 수 있다. 새로운 모듈레이터 사양은 표2와 같으며 펄스 전압 400 kV, 펄스 전류 500 A, 펄스폭 7.5 μs , 펄스 반복율은 10 Hz이다. 고전압 인버터 전원공급기는 20 kJ/s이며 충전시간은 약 80 ms이다. 빔 전압 안정도 0.1 %rms 이다.

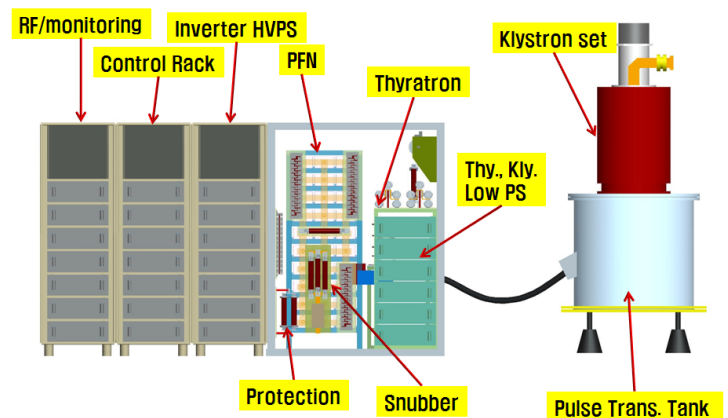
<표 3> 고전압 인버터 전원공급기를 사용한 모듈레이터 사양

Description	Unit	Value
Peak Power	MW max	200
Inverter CC HVPS Average Power	kJ/sec	20
Repetition Rate	Hz normal	10
Beam Voltage Stability(rms)	%	> 0.1
Pulse Peak Output Voltage	kV	400
Pulse Peak Output Current	A	500
ESW	μs	7.5
Flat-top Width	μs	4.4
Charging Time	ms	80

그림 2는 고전압 인버터 전원공급기로부터 공급받은 에너지를 PFN 커패시터에 직접 충전시켜서 싸이라트론 스위치를 통하여 부하에 에너지를 전달하는 방식을 취하고 있다. 스위칭시 발생하는 노이즈와 회로의 인덕턴스에 의한 역전압에 의한 인버터 전원공급장치를 보호하기 위한 저항과 다이오드로 구성된 보호회로가 첨부되어 있으며 스위칭시 부하에 발생하는 노이즈를 저감하기 위하여 RC 스너버를 사용하고 있으며 트랜스퍼머에 의한 역전압을 제거하기 위한 테일 크리퍼(Tail Clipper)회로를 사용하고 있다.



<그림 3> 고전압 인버터 전원공급장치를 사용한 펄스 모듈레이터 회로



<그림 4> 새로운 형태의 모듈레이터

2.4 진공 시스템

PLS-II 선형가속기 진공계는 46개의 가속관(Accelerating Column), 13대의 에너지 배가장치(SLED), 그리고 약 400 m의 도파관(Waveguide)으로 구성되어 있다. 대전력 초고주파의 전송과 전자빔의 가속운동이 이루어지는 가속장치의 대부분은 전자의 breakdown이나 전자의 산란을 방지하기 위하여 초고진공이 요구된다. 가속장치는 가속관에 마이크로파를 공급하는 클라이스트론을 하나의 단위로 하는 모듈로 구분한다. PLS-II 선형가속기는 PLS 선형가속기의 가속관을 비롯한 터널의 구조를 유지하면서 에너지를 2.5 GeV에서 3.0 GeV로 높이기 위해 갤러리에 클라이스트론을 추가하여 가속관에 공급되는 마이크로파 에너지를 높여서 단위길이 당 가속구배(accelerating gradient)를 높이는 형태를 채택하였다. MK1, MK11, MK12, MK13, MK14의 5개 모듈은 한 대의 클라이스트론으로 두 개의 가속관을 운전하는 형태이고, MK2 ~ MK10의 9개 모듈은 한 대의 클라이스트론으로 네 개의 가속관을 운전하도록 하였다. 선형가속기 터널은 네 개의 가속관마다 자동 차단밸브를 설치하여 진공누설 사고 시 가속구간의 오염을 최소화 하도록 하였다. 진공 시스템의 설계 목표는 아래와 같다.

- 가속관 중심에서의 진공도 : 5×10^{-7} Torr
- 도파관에서의 진공도 : 5×10^{-7} Torr
- 클라이스트론 출력 윈도우 근처의 도파관 진공도 : 5×10^{-7} Torr
- 전자총 진공도 : 1×10^{-8} Torr
- 진공 시스템 내부는 기름이나 유기물에 의한 오염이 없도록 한다.

진공 시스템의 설계에 적용한 값들은 아래와 같다.

- 가속관과 도파관에 사용한 무산소동의 가스 방출율 : 3×10^{-11} Torr·liter/s
- 스테인레스강의 가스방출량 : 1×10^{-11} Torr·liter/s
- 3 m 가속관의 중심에서 끝까지의 컨덕턴스 : 1 liter/s
- 1 m 길이 도파관의 컨덕턴스 : 20 liter/s
- 가속관 배기구에서의 펌핑 스피드(effective pumping speed) : ~ 10 liter/s
- 클라이스트론 윈도우에서의 펌핑 스피드(effective pumping speed) : ~ 20 liter/s

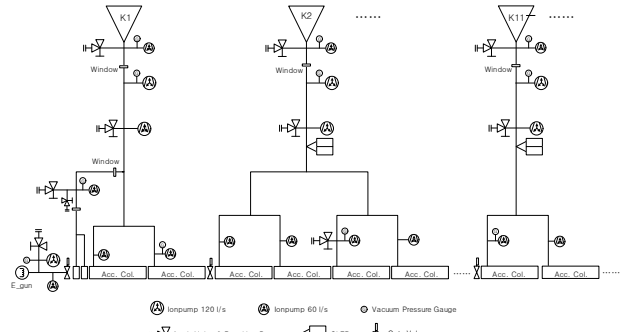
선형가속기의 진공 시스템은 선형가속기 구조가 지니는 컨덕턴스의 제한을 극복하고 가속관의 진공도를 개선하기 위하여 적당한 위치에 펌프를 분산하여 배치하였다. 한 대의 클라이스트론과 두 개의 가속관으로 이루어진 모듈은 5대의 이온펌프를, 한 대의 클라이스트론과 네 개의 가속관으로 이루어진 모듈은 7대의 이온펌프를 배치하였다. 각각의 가속관 근처에는 60 liter/s의 이온펌프를 배치하였다.

갤러리에는 14대의 클라이스트론과 13대의 에너지 배가장치가 설치된다. 클라이스트론 윈도우와 이중 윈도우 사이에는 60 liter/s의 이온펌프를 배치하여 공간적으로 분리되어 있는 구간을 배기하도록 하였다. 도파관에 비하여 상대적으로 내용적이 큰 에너지 배가장치 옆에는 120 liter/s의 이온펌프를 배치하였다. 이온펌프의 크기와 위치는 PLS의 오랜(약 16년 이상) 운전경험에 비추어 볼 때 적절한 것으로 판단된다.

PLS-II 선형가속기에서는 운전중에도 클라이스트론의 교체가 가능하도록 이중 윈도우를 채택하였다. 이중 윈도우는 클라이스트론 출력 윈도우 바로 뒤에 설치한다. 그러므로 클라이스트론은 이중 윈도우에 의하여 가속장치로부터 완전히 분리된 구조를 지니게 된다. 새로운 클라이스트론을 설치한 다음 클라이스트론 윈도우와 이중 윈도우사이의 고립된 공간은 앵글밸브에 연결된 배기포트에 이동식 터보분자펌프 시스템을 연결하여 약 1×10^{-5} torr 이하로 초기배기를 한 다음 이온펌프를 구동하여 운전에 필요한 압력을 얻도록 한다.

일반적인 모듈에서는 초기배기를 위한 배기포트를 갤러리에 두 개 설치하고 진공 압력을 측정하는 게이지는 가속관과 윈도우 근처 등 세 개를 설치한다. PLS 선형가속기 터널에 설치된 배기포트는 그대로 유지한다. 이동식 터보분자펌프와 가속장치는 KF 플랜지로 연결하고 다른 모든 플랜지는 구리 가스켓을 사용하는 CF 형식의 플랜지를 사용한다.

가속관 내부와 도파관 윈도우 근처의 진공도 변화를 탐지하여 설정압력보다 진공도가 나빠지면 인터록 시스템이 작동하도록 진공 압력 게이지(cold cathode gauge)를 부착하고 갤러리의 적당한 위치에 제이기를 설치한다.



<그림 4> 진공시스템 구성도

3. 결 론

포항가속기 연구소에서 2.5 GeV의 장치를 3.0 GeV로 성능향상하기 위한 방안으로 현재 70 %를 사용하고 있는 클라이스트론-모듈레이터를 90 %까지 사용하고 11번 모듈의 가속관을 2개씩 분리하고 14번의 클라이스트론-모듈레이터, 가속관 2 set, 도파관 1set를 추가하여 에너지를 얻을 예정이다. 3.0 GeV 성능향상시 top-up 모드 운전을 할 예정이다.

[참 고 문 헌]

- [1] Z. D. Farkas et al., "SLED: A Method for Doubling SLAC's Energy," Proc. Of 9th Int. Conf. On High Energy Accelerators, SLAC, 1974, p. 576.
- [2] W. Namkung et al., " PLS 2 GeV Linac," Proc. of 17th Int'l Linac Conf., Tsukuba, Japan, Aug. 21-26, 1994, pp. 14-16.
- [3] G. N. Glasoe and J. V. Lebacqz, *Pulse Generators*, McGraw-Hill, 1948, Chapter 6.
- [4] S. H. Nam, J. S. Oh, M. H. Cho, and W. Namkung, "Prototype Pulse Modulator for High Power Klystron in PLS Linac," IEEE Conf. Records of the 20th Power Modulator Symp., Myrtle Beach, SC, 1992, pp. 96-99.
- [5] R. B. Neal, ed., *The Stanford Two-Mile Accelerator*, Q. A. Benjamin, New York, 1968.