

PLS-II용 200MW 인버터 고전압 전원장치를 사용한 모듈레이터 설계 제작 및 시험

박성수*, 김상희*, 권세진*, 남상훈*, 김동수**, 서민욱**, 윤형진**, 이수형**
 포항공대 가속기연구소*, 다원시스(주)**

Fabrication and Test of Inverter Modulator for PLS-II

Soung-Soo Park*, Sang-Hee Kim*, Se-Jin Kwon*, Sang-Hoon Nam*, Dong Soo Kim**, Min Wook Soe**, Heoung Jin Yoon**,
 Soo Young Lee**
 POSTECH, Pohang Accelerator Laboratory*, Dawoon Sys. corp.**

Abstract - 포항공대 가속기 연구소에서 3.0 GeV의 에너지로 성능향상(PLS-II)을 위하여 선형가속기에 모듈레이터를 증설하였다. 추가 증설을 위하여 사용될 200 MW 인버터 모듈레이터를 설계, 제작, 시험하고자 한다. 모듈레이터에는 Inverter type 고전압 전원장치를 사용하였으며 사양은 펄스 전압 400 kV, 전류 500A, 펄스폭 8us, 반복횟수 30 Hz이며 부하는 80 MW 클라이스트론을 사용하여 시험할 하였다. 본 논문에서는 설계, 제작 및 시험 결과에 대하여 논하고자 한다.

1. 서 론

현재 2.5 GeV의 에너지를 얻기 위하여 마이크로웨이브소스는 Resonant type 고전압 전원장치를 사용한 80 MW 클라이스트론과 200 MW 모듈레이터 12set를 사용하여 12 가속모듈을 하용하고 있다.[1], [2] PLS-II에서 3.0 GeV를 얻기 위하여 2개의 80 MW 클라이스트론과 200 MW 모듈레이터를 추가하여 16 set로 운영하기 위하여 모듈레이터를 설계, 제작 및 시험을 하였다. 성능향상에서 요구되는 선형가속기의 빔 안정도를 0.2% 이며 따라서 펄스를 공급하는 모듈레이터의 에너지 저장용 PFN 커패시터 충전전압의 안정도는 0.1% 이하가 요구된다. 따라서 여기에 사용하는 고전압 전원장치는 0.1% 이하의 안정도를 갖는 GA사의 인버터 고전압 전원공급장치를 사용하여 설계, 제작하여 시험을 하였다.

2. 본 론

2.1 고출력 클라이스트론 모듈레이터 시스템

3 GeV upgrade를 위한 선형가속기의 RF 전력공급장치는 현재 운전중인 12 set의 클라이스트론-모듈레이터를 4set의 클라이스트론-모듈레이터를 추가하여 16 set의 클라이스트론-모듈레이터로 구성할 예정이며 80 MW용 Toshiba E3712 클라이스트론과 Inverter HVPS를 사용한 200 MW 모듈레이터로 구성된다.

2.1.1 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 μp을 갖는 전자총으로 구성되어있다. 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 kG이다. 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. 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. 포트 종류는 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 이다.

<표 1> 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
μ-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.	° C	40	35
Cooling inlet Pressure	kgf/cm ²	10	120

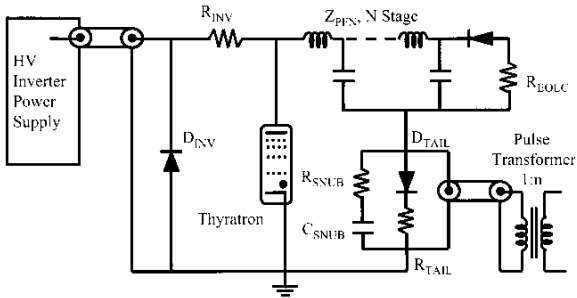
2.1.2. 모듈레이터

3 GeV 성능향상에서 요구되고 있는 에너지의 안정도는 모듈레이터의 PFN 전압이 0.1 %rms 까지 요구되고 있다. 여기에 충족하는 상용고전압 인버터 충전 방식으로 사용하여 PFN 커패시터에 고전압을 인가하고 커패시터에 충전되어 있는 에너지를 방전 후 Dead Time 영역을 두어서 싸이클론이 충분히 방전한 후 충전하는 방식을 사용할 수 있으며 필요한 전압까지 충전한 후 고전압이 안정된 영역을 확보한 최소의 시간으로 충전시간을 유지시킴으로서 싸이클론의 자가 방전의 기회를 최소화 할 수 있다. 그리고 현재 사용중인 모듈레이터의 충전부분을 고전압 인버터 전원공급기로 설계함으로서 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 us, 펄스 반복율은 30 Hz이다. 고전압 인버터 전원공급기는 60 kJ/s이며 충전시간은 약 30 ms이다. PFN 전압 안정도 0.1 %rms 이다.

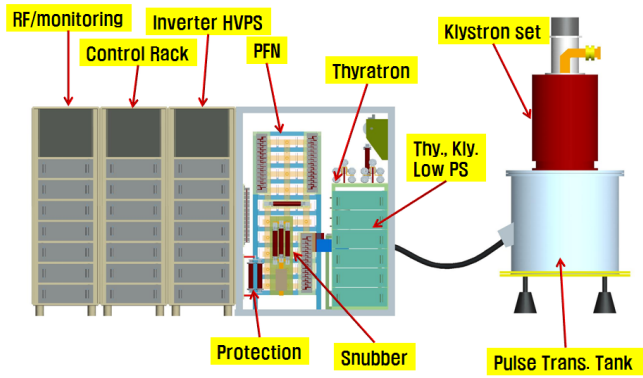
<표 2> 고전압 인버터 전원공급기를 사용한 모듈레이터 사양

Description	Unit	Value
Peak Power	MW max	200
Inverter CC HVPS Average Power	kJ/sec	60
Repetition Rate	Hz normal	30
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	30

그림 1은 고전압 인버터 전원공급기로부터 공급받은 에너지를 PFN 커패시터에 직접 충전시켜서 싸이리트론 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 클리퍼(Tail Clipper) 회로를 사용하고 있다. 그림 2는 모듈레이터 도면으로 공간상의 문제등을 점검하기 위하여 3D로 구현하였다.



<그림 1> 고전압 인버터 전원공급장치를 사용한 펄스 모듈레이터 회로



<그림 2> 새로운 형태의 모듈레이터

2.3 모듈레이터 제작

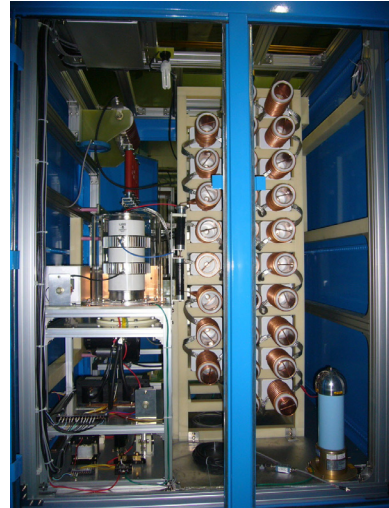
그림 3과 그림 4은 200 MW 모듈레이터를 제작한 사진을 보여주고 있다.



<그림 3> 제작한 모듈레이터1

그림 3부분은 고전압 보호회로 및 RC snubber 회로부분을 보여주고 있

으며 그림 4은 PFN 부분과 싸이리트론부분을 보여주고 있다. PFN section은 50 kV, 50 nF의 용량의 커패시터 28개와 4 uH의 인덕터 28개로 구성되어 있으며 인덕터의 내부 실린더로 인덕터의 값을 조정하여 PFN tuning을 한다. 그리고 싸이리트론은 Litton 4888를 사용하고 있으며 50 kV, 10 kA 사양을 가지고 있으며 10 Hz로 운전한다. 고전압 측정을 위하여 Ross사의 50 kV, 5000:1, 0.01% 안정도를 갖는 고전압 프로브를 사용하고 있다. 그림 5은 모듈레이터 고전압 전원공급용 전원장치와 저전력 전원공급장치 및 모듈레이터 제어기용 Rack을 보여주고 있다. 고전압 전원공급장치는 General Atomics사의 50 kV, 10 kJ/sec 3개를 사용하여 30 kJ/sec의 용량으로 10 Hz로 운전하였다.



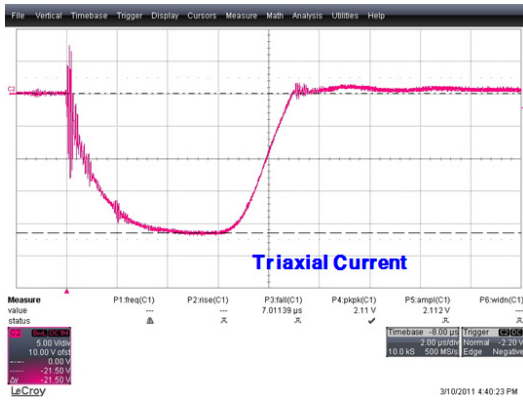
<그림 4> 제작한 모듈레이터2, PFN



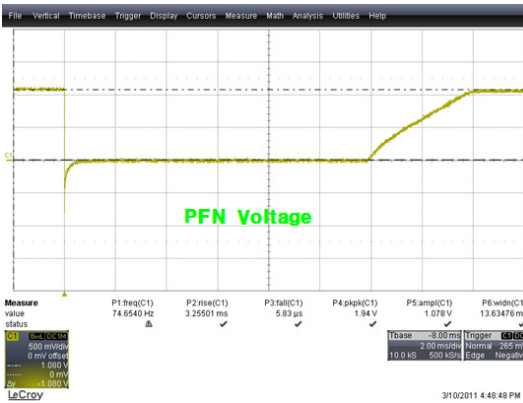
<그림 5> 고전압 전원공급장치 및 PLC 제어기

2.4 모듈레이터 시험

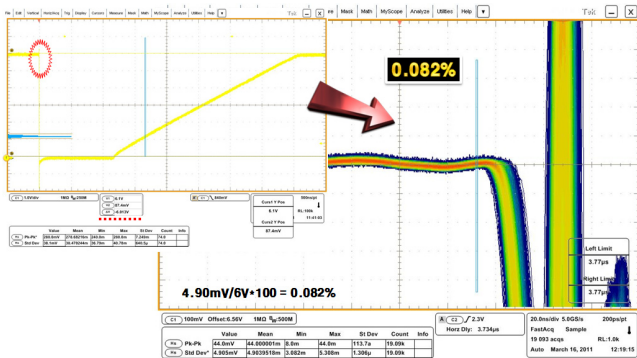
그림 6은 Triaxial current이며 그림 7는 PFN 충전전압으로 PFN의 임피던스를 측정하기 위하여 부하단을 단락시켜서 측정한 파형이다. 고전압 5.4 kV를 인가시 약 2.15 kA가 흐르스 PFN 임피던스는 약 2.51 Ω을 얻었다. 그림 8은 PFN에 충전되는 전압의 안정도(Stability)를 측정하였으며 측정결과 0.082%rms를 얻었다. 그림 9은 부하에 인가되는 펄스 전압의 Jitter를 측정하여 약 1.952 ns을 얻었다. 그림 10는 모듈레이터 PFN에 충전된 전압 파형을 보여주고 있으며 클라이스트론으로 부하를 사용하여 Ross사의 5000:1의 전압프로브로 측정한 결과 약 43 kV를 충전한 값을 보여주고 있으며 충전시간은 약 43.4 ms이다. 그림 11은 클라이스트론에 인가되는 전압파형으로 PFN에 충전된 전압이 43 kV일 경우 펄스 전압 395 kV, 펄스 전류 458 A, 펄스폭 7.5 us를 가지며 10 Hz로 운전을 하였다.



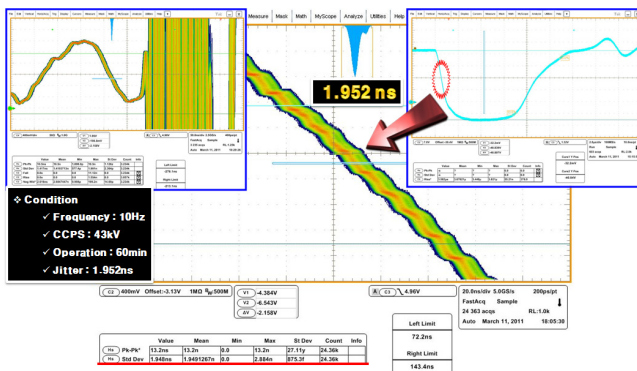
<그림 6> Triaxial Current 21.5 V X 20 = 2,150 A



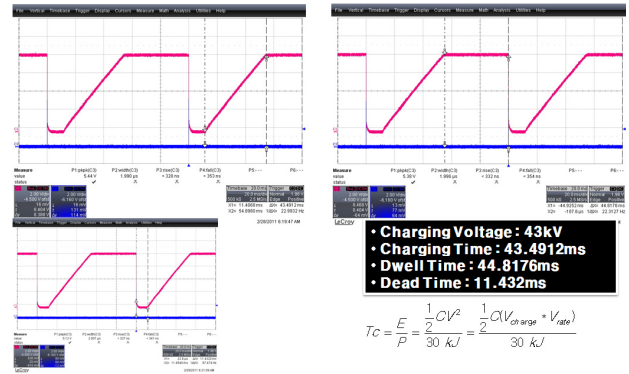
<그림 7> PFN Voltage 1.08 V X 5,000 = 5,400 V



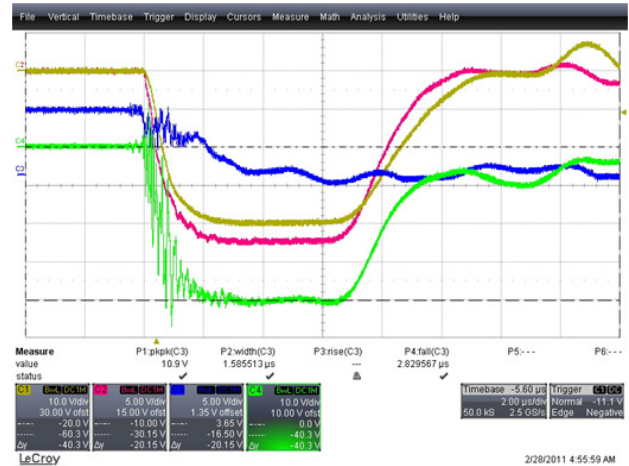
<그림 8> PFN Voltage Stability 측정



<그림 9> 펄스 전압의 Jitter 측정



<그림 10> PFN에 충전된 전압 파형(43 kV 충전, 충전시간 43.4 ms)



<그림 11> 43 kV 충전후 부하에 인가되는 전압 전류 및 PFN 충전 파형(펄스 전압 395 kV, 펄스 전류 458 A, 펄스폭 8.0 us)

3. 결론

포항가속기 연구소에서 2.5 GeV의 장치를 3.0 GeV로 성능향상하기 위하여 4set의 클라이스트론 모듈레이터를 제작 및 설치하여 시험중에 있다. 클라이스트론에서 요구되는 최대 펄스 출력 약 395 kV, 458 A, 8.0 us를 얻었으며 PLS-II에서 요구되는 PFN에 충전전압 안정도도 0.082%를 얻었다.

[참고 문헌]

- [1] 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.
- [2] R. B. Neal, ed., *The Stanford Two-Mile Accelerator*, Q. A. Benjamin, New York, 1968.