

고정밀 고전압 CCPS를 이용한 XFEL 200MW 펄스 모듈레이터 시험

박성수*, 김상희*, 권세진*, 이흥수*, 강흥식*, 김동수**, 신현석***
 포항공대 가속기연구소*, 다원시스(주)**, 포스코ICT(주)***

XFEL Pulse Modulator Test using High Precision High Voltage CCPS

S.S. Park*, S.H. Kim*, S.J. Kwon*, H.S. Lee*, H.S. Kang*, D.S. Kim**, H.S. Shin***
 POSTECH, Pohang Accelerator Laboratory*, Dawoon Sys. corp.**, POSCO ICT. corp.***

Abstract 포항공속기 연구소에서 4세대 전자를 가속시키기 위하여 RF 공급원으로 사용하는 펄스 모듈레이터의 고정밀 안정도는 50ppm 이하의 고정밀이 요구된다. 200 MW 모듈레이터에 공급하기 위하여 개발된 고정밀 CCPS사양은 50 kV, 120 kJ/sec, 2400mA, 20ppm이하이다. XFEL용 모듈레이터는 고정밀 고정밀 CCPS를 적용하여 운전하였으며 모듈레이터 사양은 400kV, 500A, 8us, 60Hz, beam voltage stability 0.005(%)이다. 본 논문에서는 개발한 고정밀 고정밀 CCPS를 사용하여 시험한 모듈레이터의 시험 결과에 대하여 발표하고자 한다.

1. 서 론

포항공속기연구소의 4세대 10 GeV의 에너지를 얻기 위하여 마이크로 웨이브소스는 Inverter type의 고정밀 전원장치를 사용한 80 MW 클라이스트론과 200 MW 모듈레이터 46set를 사용하여 전자를 가속할 예정이다. 4세대에서 요구되는 RF의 Phase 안정도는 0.1도 이하이며 모듈레이터의 PFN 전압 안정도(Stability)는 RMS 50ppm 이하이다. 개별 모듈레이터의 사양은 출력 200 MW, 빔전압 400 kV, 빔전류 500 A, 펄스폭 8us, 반복횟수 60 Hz이고 부하로는 S band E37320 80 MW Klystron을 사용할 예정이다. 모듈레이터의 전압 안정도 요구조건을 만족하기 위하여 Inverter type 고정밀 전원장치와 고정밀 고정밀 인버터 전원공급장치와 DSP 제어기를 개발하였으며 개발한 장치를 가지고 모듈레이터를 시험을 하였다.

2. 본 론

2.1 고품질 클라이스트론 모듈레이터 시스템

10 GeV 에너지를 가속하기 위한 선형가속기의 RF 전력공급 장치는 46 set의 클라이스트론 모듈레이터로 구성할 예정이며 80 MW용 Toshiba E37320 클라이스트론과 Inverter HVPS를 사용한 200 MW 모듈레이터로 구성된다.

2.1.1 클라이스트론 튜브

S band 클라이스트론은 80 MW Toshiba E 37320 클라이스트론을 사용할 예정이며 사양은 표 1과 같다. Toshiba E37320 클라이스트론은 입력 캐비티와 출력 캐비티를 포함하여 5개의 캐비티로 구성 되어있으며 2.0 μp를 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 집속하기 위하여 Electromagnetic field를 사용하고 있으며 클라이스트론 캐비티의 외부에 설치되어 있다. 최대 magnetic field의 세기는 약 1.2 kG이다.

2.1.2. 모듈레이터

10 GeV의 에너지가 요구되고 있는 모듈레이터의 PFN 전압의 안정도는 rms 0.005 % 이하 까지 요구되고 있다. 이 요구조건을 만족하기 위하여 인버터 type의 고정밀 고정밀 전원공급장치를 이용하여 모듈레이터의 고정밀 안정도를 얻을수 있으며 모듈레이터 사양은 표2와 같으며 펄스 전압 400 kV, 펄스 전류 500 A, 펄스폭 8.0 us, 펄스 반복율은 60 Hz이다. 고정밀 인버터 전원공급기는 120 kJ/s이며 충전시간은 약 14 ms이다.

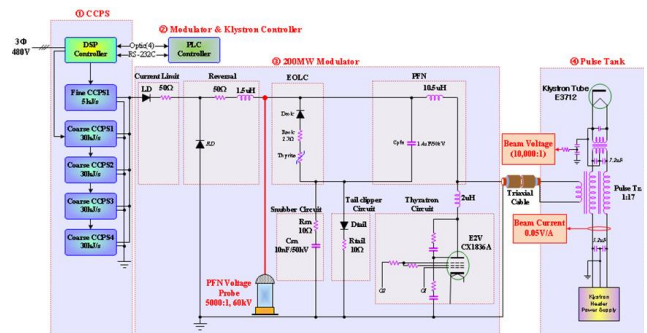
〈표 1〉 S-band 클라이스트론의 사양

Description	Unit	Toshiba E37320
Frequency	MHz	2,856
Pulse width	μs	4
Beam Voltage	kV	400
Beam Current	A	500
Repetition Rate	Hz Max.	60
μ perveance		2.0
RF Output Power	MW	80
Drive Power	W Max.	500
Gain	dB Max.	53
Efficiency	%	43

〈표 2〉 고정밀 인버터 전원공급기를 사용한 모듈레이터 사양

Description	Unit	Value
Peak Power	MW max	200
Inverter CC HVPS Average Power	kJ/sec	120
Repetition Rate	Hz normal	60
PFN Voltage Stability(rms)	%	> 0.005
Pulse Peak Output Voltage	kV	400
Pulse Peak Output Current	A	500
ESW	μs	8.0
Flat top Width	μs	4.5
Charging Time	ms	14

그림 1은 펄스를 만들어 주는 모듈레이터의 회로도 이며 고정밀 인버터 전원공급기로부터 공급받은 에너지를 PFN 커패시터에 직접 충전시켜서 싸이리트론 스위치를 통하여 부하에 에너지를 전달하는 한다.

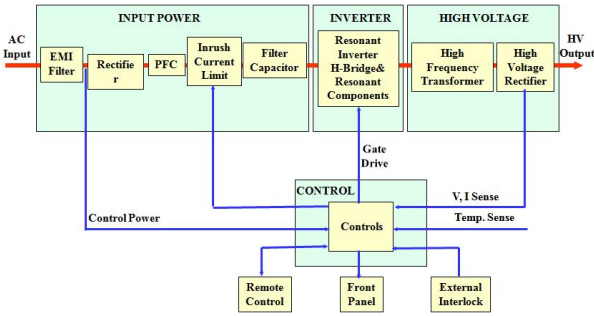


〈그림 1〉 고정밀 인버터 전원공급장치를 사용한 펄스 모듈레이터 회로

2.2. 인버터형 고정밀 고정밀 전원공급장치

펄스 모듈레이터의 고정밀 공급용으로 사용하는 고정밀 전원장치는 국내에서 개발한 것으로 고정밀 전원장치 구성은 다음과 같다. 30 kJ/sec 4대, 5 kJ/sec 1대, DSP 정밀 제어기 1대가 set로 구성이 된다. 그림 2는 인버터 고정밀 전원장치의 내부 구성

도이다.



<그림 2> 인버터형 고정밀 고전압 전원장치 내부 구성도

PFN에 충전된 전압의 안정도를 50ppm이하까지 얻기 위하여 사용한 고정밀 고전압 전원공급장치의 충전방식은 2종류의 용량을 가진 고전압 전원공급장치를 개별적으로 제어범위를 정하여 원하는 안정도를 얻도록 하는 제어 방식을 사용한다 [1]. 4개의 30 kJ/sec 및 1개의 5 kJ/sec의 전원공급장치를 T1까지는 30 kJ/sec의 일반 전원장치와 5kJ/sec의 정밀 전원장치 모두 공급을 하고 T1 T2까지는 정밀 전원장치로 PWM 제어를 하고 T2 T3까지는 Regulation mode로 운전한다.

2.3 인버터형 고정밀 고전압 전원장치 시험

인버터형 고정밀 고전압 전원장치를 시험하기 위하여 그림 3과 같이 200 MW 모듈레이터를 제작하여 설치하였으며 전원공급장치는 일반 고전압 전원공급장치 30 kJ/sec 4개, 고정밀 고전압 전원공급장치 5 kJ/sec 1개, DSP controller 1개등으로 구성을 하여 시험을 하였다.



<그림 3> 인버터형 고정밀 고전압 전원장치 시험 설비

그림 4는 30 kJ/sec의 전원공급장치가 스위칭 할 경우 충전전압과 Fine 전원공급장치가 스위칭 할 경우의 충전전압 파형을 측정 한 파형이며 CCPS의 스위칭 주파수는 50 kHz 이다.

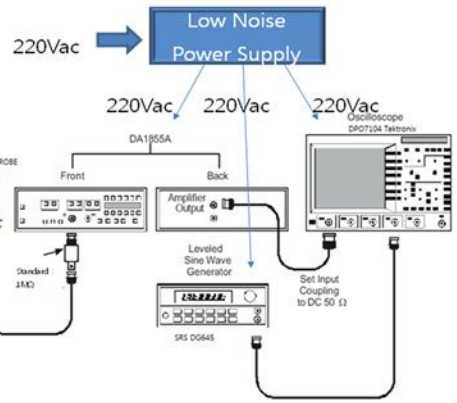


<그림 4> 큰용량 CCPS 스위칭시 PFN 충전 전압 및 Fine CCPS 충전전압 파형

2.3.1 인버터형 고정밀 고전압 안정도 측정장치

PFN 커패시터에 충전되는 고전압의 50ppm(0.005%)을 측정

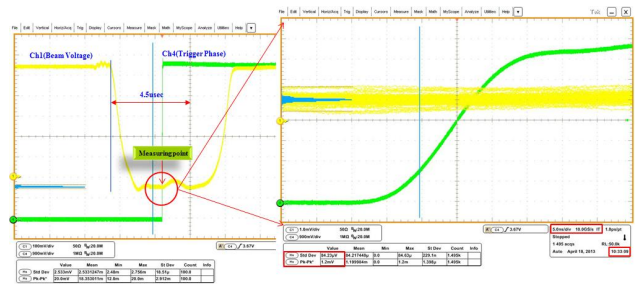
하기 위하여 그림 5와 같이 측정장치를 구성하였으며 PFN의 고전압을 정밀하게 측정하기 위하여 Ross사의 VD60 series를 선정하여 사용을 하였으며 빔전압 및 빔전류는 Capacitance voltage divider(Stangenes사, 10,000:1)와 Current transformer(Stangenes사, 0.05V/A)를 사용하였다. 그리고 측정하는 부분의 전압 파형을 정밀하게 측정하기 위하여 Lecroy사의 Differential Amplifier DA1855A를 사용하여 PFN 전압의 offset를 주었으며 bandwidth는 1 MHz로 설정을 하였다. 그리고 측정장치는 Histogram이 가능한 장치로서 Tektronix사의 DPO7104 스코프를 사용하였으며 Histogram의 acquisition 모드에서 High resolution 모드로 11bit의 분해가 가능한 모드로 설정하였으며 Time base 5.0 ns, Sample rate 10 G/s, Amplitude 1mV로 설정하여 측정을 하였다. [2]



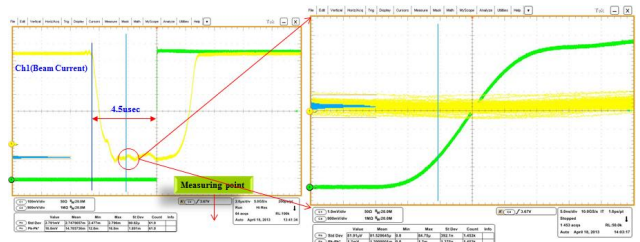
<그림 5> Stability 측정용 setup

2.3.2 펄스 전압 및 전류 안정도 측정

개선된 빔전압 및 빔전류의 안정도를 얻기 위하여 클라이스트론 및 싸이클로트론에 인가되는 히터 전원의 꼭지점 부분에 놓이도록 AC 전원과 동기하여 시험을 하였다. 그림 6은 PFN 전압을 42 kV로 충전한 상태에서 모듈레이터를 60 Hz 운전하면서 약 3분간 누적하여 측정 한 파형으로 빔전압 Stability는 약 19.22ppm이었다. 그림 7은 PFN 전압을 42 kV로 충전한 상태에서 모듈레이터를 60 Hz 운전하면서 약 3분간 누적하여 측정 한 파형으로 빔전류 Stability는 약 37.4ppm이었다.



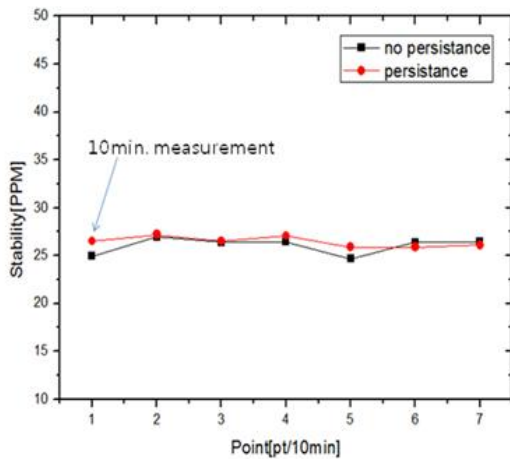
<그림 6> 빔전압 Stability 측정 파형



<그림 7> 빔전류 Stability 측정 파형

그림 8은 그림 6과 동일한 방법으로 3분씩 누적하여 각각의 안정도를 측정하였으며 30분 간격으로 약 7회 측정을 하여 시간에 따른 안정도를 나타내었다. 여기에서 안정도는 비슷한 값을 가지고 있으며 시간에 따른 시험장소의 온도 변화에 따른 빔 전압의 변이율을 보여주고 있

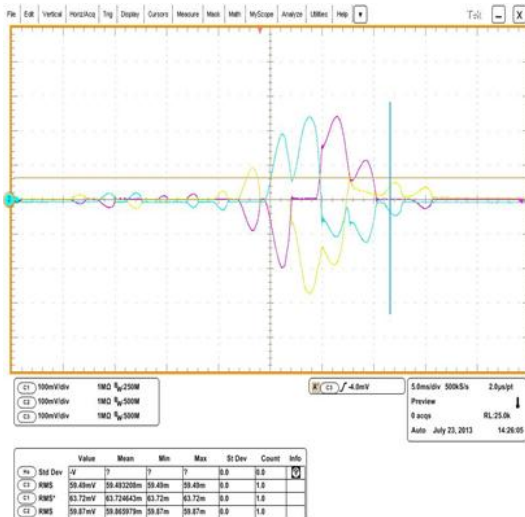
며 실험실 온도의 변화율은 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 이내이며 모듈레이터 캐비넷의 온도 변화가 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 일 때 약 5.0ppm 이내에서 변화하는 것을 알 수 있었다.



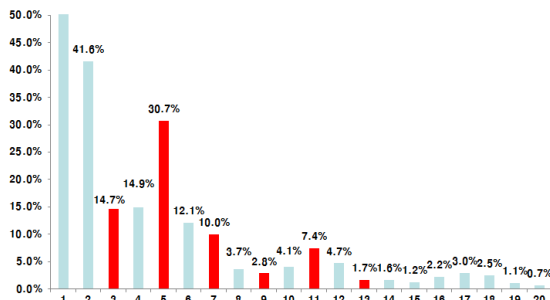
<그림 8> 빔전압 Stability 연속 측정 데이터

2.3.3 인버터 고전압 전원공급장치의 입력 전원 고조파 측정 및 분석

200 MW 모듈레이터에 클라이스트론 부하를 설치하여 고정밀 인버터 전원장치에서 발생하는 고조파를 측정하여 분석하였다. 그림 9는 전원측에 40 kV 60Hz로 운전시 480Vac 입력측에서 측정된 전류 파형이다.



<그림 9> 인버터형 고정밀 고전압 전원장치 전류 파형



<그림 10> 입력 전원측 고조파 전류 스펙트럼[%]

그림 10은 입력 전원측에서 측정된 고조파 전류 스펙트럼으로 우수 고조파 2차 41.6%, 4차 14.9%가 발생을 하였으며 3차, 5차 7차의 고조

파가 각각 14.7%, 30.7%, 10.0% 발생하였다. 측정된 각상의 파형과 고조파를 분석 결과 한주기의 16.67ms 중 13.4 ms 기간 동안에만 인버터 전원장치가 동작을 하는 특성으로 인하여 예상하지 못한 고조파가 발생한 것으로 판단하였다. 이 문제를 해결하기 위하여 입력 전원측에 1 mH의 인덕터를 추가 했을 경우 전류 파형이 개선이 되며 고조파 외형율이 59.82 ~ 66.5%에서 17.48 ~ 18.21로 약 72% 저감되는 효과가 나타났다. 그러나 1.0mH의 인덕터는 실측 평균전류 105.3(A) 기준시 인덕터 용량이 12.5 KVA이며 모듈레이터 용량 87 KVA기준으로 15% 인덕터가 설치된 것으로 판단이 되며 일반적으로 비선형부하의 고조파 전류 감소를 위하여 설비용량의 3 ~ 5% 인덕터가 적용된다. 따라서 약 5%의 인덕터를 적용할 경우 약 300 uH 정도의 인덕터를 사용해야하며 추가로 인버터 전원공급장치의 DC link에 사용하는 커패시터의 용량을 증가시켜 저감할 수 있다.

3. 결 론

포항가속기 연구소에서 4세대용 모듈레이터에 사용하는 30 kJ/sec 일반 고전압 전원장치 4set와 5 kJ/sec 고정밀 고전압 전원공급장치 1set 그리고 DSP 제어를 개발하였다. 개발한 일반 및 고정밀 고전압 전원공급장치를 이용하여 200 MW 모듈레이터에 충전 및 방전시험을 하여 PFN 커패시터 및 빔전압의 안정도(Stability)를 측정하여 요구하는 성능을 얻었다. 빔전압 안정도는 19.8ppm을 얻었다. 그리고 인버터 전원장치를 사용할 경우 발생하는 고조파 문제는 입력 전원측에 부하 용량의 약 5%의 인덕터를 적용할 경우 약 300 uH 정도의 인덕터를 사용하고 추가로 인버터 전원공급장치의 DC link에 사용하는 커패시터의 용량을 증가시켜 저감할 수 있다는 결론을 얻었다.

[참 고 문 헌]

- [1] J.S. Oh, S.S. Park, Y.J. Han, I.S. Ko, W. Namkung, "Design considerations for the stability improvement of klystron modulator for pal xfel," Proceeding of 2005 Particle Accelerator Conference, Knoxville, Tennessee, 2005, pp. 1165 1167.
- [2] T. Shintake, T. Inagaki, K. Shirasawa, C. Kondo, T. Sakurai, "Compact klystron modulator for xfel/spring 8," Proceedings of IPAC'10, Kyoto, Japan, 2010, pp. 3287 3289.