

### 150MW 모듈레이터의 성능개선과 시험

권세진, 손윤규, 장성덕, 오종석  
포항가속기연구소

### Upgrade and Test of 150MW Pulse Modulator

S. J. Kwon, Y. G. Son, S. D. Jang, J. S. Oh  
Pohang Accelerator Laboratory

**Abstract** - 포항가속기연구소 선형가속기의 대전력 RF부품의 시험과 RF중폭을 위해 사용되는 클라이스트론 튜브의 시험용 전원으로 펄스전원인 모듈레이터를 사용하고 있다. 고전적인 방식의 교류전압을 변환하여 직류로 만들고 이 전원을 L-C공진충전에 의해 펄스를 생성하는 펄스 커패시터에 약 2배의 직류전원으로 충전하는 기법을 사용하고 있다. 이들 전원은 저주파의 대용량 변압기를 사용하여 직류로 변환하는 부품들의 부피가 크다. 새로운 충전기법을 적용한 펄스전원의 경우는 고주파 인버터 전원을 채택하여 그 부피를 줄이고 지령충전에 의해 펄스를 생성하는 싸이클로트론의 애노드에 고전압이 머무는 시간을 줄임으로서 자발방전이나 고전압 아크에 의한 오동작을 최소화 할 수 있다는 장점이 있다. 본 논문에서는 고주파 전원 방식을 채용한 펄스 모듈레이터의 제어방법의 개선과 부피를 줄여 운전의 효율성을 높인 내용으로 발표하고자 한다.

이는 정비의 효율성과 실험장치로서 구조변경이 쉽고 부하에 대한 대응이 용이하도록 하였다. 새로운 부품의 길들이기와 파워링 시험시에 펄스폭 조정과 변경이 쉬우며, 부하의 문제 발생 시에는 운전기록이 용이하도록 상위 레벨에서의 운전조작이 간단해진다.

〈표 1〉 150MW 펄스 모듈레이터의 사양

Max. Peak Power (MW)	150
Max. Average Power (kW)	58
Peak Output Voltage (kV)	354.8
Peak Output Current (A)	422
Load Impedance (W)	839
Flat Top Width (μs)	4.0
High Voltage Pulse Length (μs)	6.5
Pulse Energy (Joule)	975.5
Pulse Repetition Rate (pps)	60

### 1. 서 론

선형가속기의 대출력 RF 부품과 클라이스트론 튜브, RF Dummy Load (SIC), 에너지 배가장치등의 시험장치로 펄스 전원장치가 필요하다. 펄스를 생성하기위한 기술로는 L-C공진충전에 의한 방식과 인버터 전원을 채용하는 시스템들이 제안되고 있다. 고전적인 방법에 의해 제작된 전원은 부피가 크고 용량확장에 신속하게 대응이 어렵고 자료수집에 대한 데이터 베이스화가 어렵다는 단점이 있다. 그에 비해 고전압의 인버터시스템을 채용하는 시스템에 있어서 장치의 간소화가 쉽고 제어시스템의 구성을 간략화 할 수 있다. 모듈레이터 제어시스템으로는 PLC를 채택하여 각각의 제어를 담당하도록 하고 전반적인 신호를 터치패널에서 디스플레이와 제어가 되도록 하였다. 또한, Ethernet을 통하여 인터넷에서 모든 운전상황과 운전 데이터를 파악할 수 있다. 모듈레이터의 충전전원으로 CCPS (Capacitor Charging Power Supply)를 구성되었다. 본 논문에서는 기존의 모듈레이터에 비해 사이즈를 줄이고 콤팩트화한 전원장치의 설계와 실험에 대한 내용을 보이고자 한다.

### 2. 본 론

#### 2.1 시스템 구성

그림 1은 제안된 전원장치의 구성도를 나타내었다. PFN콘덴서의 충전전압의 안정도를 높일 목적으로 인버터 전원장치의 출력리플 특성을 1% 이하가 되도록 제어하는 방법을 채택하였다. 각각의 용량이 다른 전원을 병렬로 운전이 되도록 구성하고 방전펄스에 대한 반복율이 높은 경우 빠른충전과 전원의 맥동율의 끝부분에서는 전원의 안정도가 좋도록 적은 양의 전압을 제어함으로써 그 정밀도를 높였다. 장치의 사양은 표 1과 같다.[1]

2단 병렬구조의 PFN콘덴서는 4단 5열의 병렬구조로 변경하여 높이를 낮추었고 고전압 전원과 케이블을 케비넷 함내로 수납하는 구조가 되도록 설계되었다.

#### 2.2 인버터 전원장치

Full bridge 컨버터 토폴리지를 사용한 영전압 스위칭에 의한 출력전압 50 kV, 평균출력 15 kW급으로 설계하였다. 콘덴서 전원충전용 전원으로는 충전전압의 전압안정도가 펄스전압에 있어서 평탄도를 좋게 한다. 이를 위해서는 콘덴서에 충전되는 전압이 일정해야 방전펄스에 있어서 안정도가 좋게 된다. 인버터 설계에 사용된 식은 다음과 같다. [2][3][4][5]

$$f_s = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_S C_S}} \text{ [Hz]} \quad (1)$$

$$I_{pk} = \frac{V_{DC}}{Z} \text{ [A]} \quad (2)$$

$$Z = \sqrt{\frac{L_S}{C_S}} \text{ [\Omega]} \quad (3)$$

$$t_{ON} = \frac{1}{2} \times T_0 \text{ [\mu s]} \quad (4)$$

$$f_{max} = \frac{1}{t_{on} + \text{deadtime}} \text{ [kHz]} \quad (5)$$

$$P_{CH} = \frac{C_L V_T^2}{2t_c} \text{ [J/S]} \quad (6)$$

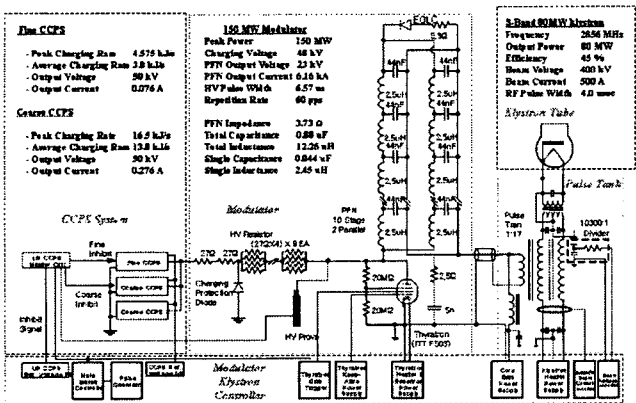
- $f_s$ : 공진주파수[kHz]
- $Z$ : 임피던스 [Ω]
- $f_{max}$ : 최대운전주파수[kHz]
- $C_L$ : 부하 콘덴서[μF]
- $T_0$ : period [μs]
- $C_S$ : 공진커패시터[μF]
- $I_p$ : 공진1차 최대전류[A]
- $t_{on}$ : 스위치 온 시간[sec]
- $P_{ch}$ : 인버터 용량[kJ/s]
- $V_T$ : 인버터 출력전압[kV]
- $V_{DC}$ : DC bank전압[V]
- $L_S$ : 공진인덕터[μH]

인버터전원의 최대전류  $I_{max}$ 와 평균출력  $P_{av}$ 는 다음 식(7, 8)과 같다.

$$I_{max} = \frac{2 \times P_{CH}}{V_T} \text{ [A]} \quad (7)$$

$$P_{AV} = \frac{1}{2} V_{avg} \text{ [kW]} \quad (8)$$

모듈레이터의 충전시스템으로 사용되는 인버터 전원의 장점은 높은 신뢰도와 지령충전이 가능하다는 것이다. 또한 단락회로에 사고전류의 제한이 가능하고 크기도 소형이어서 SCR를 사용한 고전적인 충전방식보다는 부피를 크게 줄일 수 있다. 또한 간단한 유지 보수, 용이한 확장성 및 수정이 가능한 제어의 인터페이스 기능을 가진다. 고전압을 필요로 하는 장치의 전원을 만드는 방법 중의 하나인 직렬공진을 이용하는 것으로 공진임피던스의 크기가 작을수록 공진최대전류는 크게 된다. 이와 같이 공진전류를 크게 하는 것은 2차 측으로 전력을 전송하는데 유리하며, 부하 측에서 필요한 에너지는 공진회로 1차 측의 임피던스와 같은 것을 알 수 있다. 즉, 부하에 충전되는 전력은 메인충전전원과 정밀충전전원의 용량을 합한 양은 직렬공

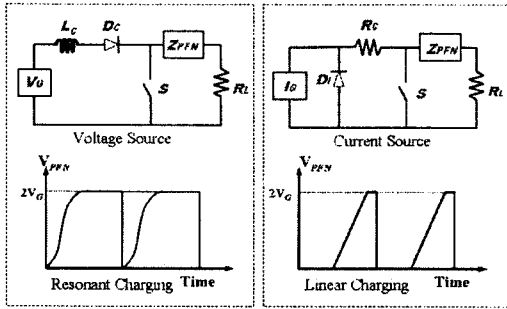


〈그림 1〉 150MW Pulse Modulator Circuit Diagram

진으로 부하에 전달되는 에너지와 같다. 그림 2는 이 두가지 충전방식의 충전과형을 보였다. 인버터 전원의 용량을 결정하는 직렬공진회로의 설계는 식 (9)과 (10)를 이용하여 구할 수 있다. 표 2는 메인전원장치와 정밀전원장치의 사양을 나타내었다

$$P = f_0 E_0 [W] \quad (9)$$

$$E_0 = 0.5 C_R (2V)^2 [J] \quad (10)$$



(a) 정전류원 (b) 정전압원  
 <그림 2> Modulator Charging Waveform

<표 2> 인버터 사양

Parameter	Coarse	Fine
Output Voltage [kV]	50	50
Resonant Frequency [kHz]	41.67	37.7
Peak Charging Rate [kJ/s]	33	4.61
Primary AC Voltage [V]	480	480
Duty Max.	0.8	0.8
Load Capacitor [μF]	0.88	0.88
Filtered Primary DC Voltage [V]	648	648
Resonant Impedance [Ω]	2.935	25.5
Resonant inductance [μH]	11.2	108
Resonant Capacitance [μF]	0.3	0.165
Max. Power [kW]	27.6	3.69
Output Average Current [A]	1.1	0.205
Peak Switching Current [A]	224	25.33
Efficiency of the Power Supply [%]	< 90	< 90

표 2는 제안된 인버터 전원장치는 각각의 독립된 전원으로 병렬조합에 의한 운전으로 충전초기에는 각기 2대의 전원을 조작하여 운전을 행하고 충전후기부분에서는 메인 충전전원을 오픈하고 용량이 작은 정밀 충전전원만을 운전하여 콘덴서에 충전되는 전압의 크기를 제한함으로써 출력 측의 전압안정도를 좋아지게 된다.

### 2.3 전원장치 설계

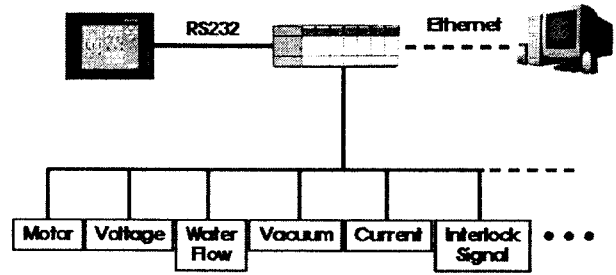
RF 부품 시험용 150MW 펄스 모듈레이터의 설계 요구조건인 펄스폭 6.5 μs 의 평탄부를 갖기 위해 PFN의 10단의 콘덴서와 인덕터로 구성하였다. 회로에서 PFN의 임피던스는 식 (11)과 같다.

$$Z_{PFN} = \sqrt{\frac{L_{PFN}}{C_{PFN}}} [\Omega] \quad (11)$$

여기서,  $Z_{PFN}$ : PFN 임피던스[Ω],  $L_{PFN}$ : PFN 합성 인덕터[μH],  $C_{PFN}$ : PFN 합성정전용량[nF]을 나타낸다. 부하로 전달되는 에너지의 양은 펄스당 대략 975.5 [J]이며, 최대운전주파수는 60 [Hz]이다. 전원장치와 연계된 인버터 전원의 보호용으로 역전압 방지 다이오드와 전류제한용 저항이 삽입되어있다. 펄스 콘덴서의 경우는 부하로 전달된 에너지의 일부가 다시 역으로 충전되게되고 이 전압은 전원으로 되돌아오는 방지할 목적으로 EOLC[End of line Clipper]가 설치되어있다.

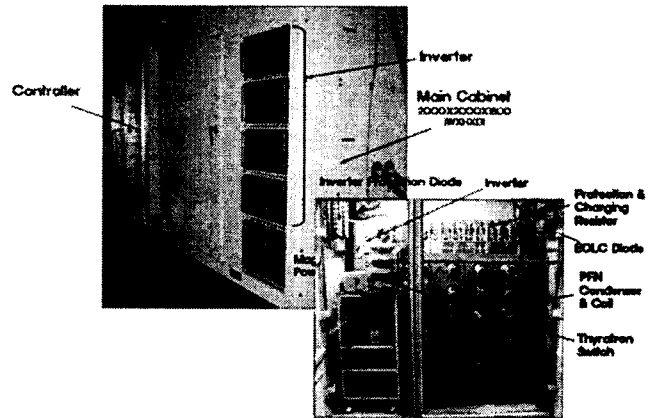
### 2.4 원격제어개선

PLC를 사용하여 운전과 관련된 각종 인터록과 안전인터록을 수용하도록 설계하였다. 제어에 필요한 전압과 전류의 값은 A/D, D/A변환을 하여 터치패널과 연계되어 조작과 디스플레이를 구현하였다. 수동과 자동으로 구분되는 원격시스템은 상위 PC환경에서 인터넷을 통하여 전원장치의 운전 상태를 확인할 수 있도록 설계하였다. 장치의 구동과 안전을 위해 설정된 인터록은 편의상 스테틱과 다이내믹으로 구분하고 스테틱 인터록의 경우는 장치의 운전을 오프하도록 하였으며, 다이내믹의 경우는 트리거 신호만을 제어함으로써 이상상황이 해제되면 자동으로 운전이 되도록 하였다. 제어시스템의 개략도는 그림 3과 같다.



<그림 3> Modulator 제어 시스템의 구성도

그림 4는 제작된 전원장치와 전원장치의 내부를 보였다. 전원장치의 주 캐비닛의 크기는 2 m×2 m×1.5 m(W×H×D)로 기존의 시스템의 크기에 비해 콤팩트해 졌다. 또한 주 캐비닛내부에 전원장치인 인버터를 삽입함으로써 크기를 줄임과 동시에 정비가 효과적으로 대응할 수 있는 구조이다. 내부의 PFN 콘덴서와 코일은 구조변경과 부하에 대한 설계변경이 쉬운 구조로 제작되었다. Thyratron Switch Stand는 정비가 편리하도록 외부로 돌출시킬 수 있는 구조로 되었다. 필요시 이 Stand를 외부로 돌출시키고 인버터의 정비도 수행할 수 있다.



<그림 4> 150MW 펄스 모듈레이터

## 3. 결 론

포항 방사광가속기연구소의 전자 빔 전송용 RF 부품 시험을 위한 150MW 펄스 모듈레이터의 성능개선을 하였다. 제작된 모듈레이터의 특징으로는 주 캐비닛의 크기가 기존의 전원장치와 비교하여 크게 줄어들었으며, 내부의 구조변경과 부하에 대한 설계변경이 쉬운 구조로 개선되었다. 또한, 전원장치의 제어시스템은 PLC의 사용으로 전체적인 장치의 제어가 쉽게 이루어질 수 있으며, 터치패널의 사용으로 모든 운전 상황의 파악이 쉽고, 인터넷을 통하여 운전상황을 확인할 수 있다. 제작된 150MW 펄스 모듈레이터 시스템을 통하여 가속기 운전에 필요한 RF 부품의 성능시험을 수행함과 XFEL의 전원장치인 초 고정밀 인버터의 시험을 수행해 나갈 것이다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Y. G. Son, S. D. Jang, J. S. Oh, M. H. Cho, 'Study on the high power and high voltage 35 kW, 50 kV inverter power supply' The transactions of the korean institute of electrical engineers, Vol. 51, No.11, Society of electrical machinery & energy conversion systems B, pp628-634, November 2002
- [2] 손윤규, 장성덕, 권세진, 배영순, 오종석, 조무현, 남궁원, "고출력 마그네트론 구동용 3.6 MW, 4us, 200pps 펄스 모듈레이터 개발", Trans. KIEE, Vol. 54C, No. 3, MAR, 2005
- [3] 손윤규 외, "대출력 고정압 35 kW, 50 kV 인버터 전원장치 개발에 관한 연구", 대한전기학회, 하계학술대회 논문집 B, pp992~995, 2001
- [4] J. S. Oh, S. D. Jang, S. J. Kwon, Y. G. Son, J. H. Seo, I. S. Ko, W. Namkung, "Development of an Ultra Stable Klystron-Modulator for PAL XFEL" 27th International Free Electron Laser Conference (FEL2005), 2005
- [5] S. J. Kwon, Y. G. Son, S. D. Jang, J. H. Suh, J. S. Oh, I. S. Ko, W. Namkung, "Development of an Ultra Stable High-Voltage Inverter Power Supply for the PAL-XFEL" JKPS, Vol. 48, No. 4, pp.781 ~ 785, 2006
- [6] PSIM User's Guide.