

**펄스 초-테라헤르츠 빔 라인용 펄스 모듈레이터의 설계와 제작**

손윤규\*, 권세진\*, 서재학\*, 장성덕\*, 강흥식\*, 이경태\*\*, 노성채\*\*\*  
 포항가속기연구소\*, 엠 앤드 케이\*\*, 동아하이텍\*\*\*

**Fs-THz beam line electron accelerator of pulse modulator design and fabrication**

Yoon-Kyoo Son\*, Sei-Jin Kwon\*, Jae-Hak Suh\*, Sung-Duck Jang\*, Heung-Sik Kang\*, Kyung-Tae Lee\*\*, Sung-Chae Ro\*\*\*  
 Pohang Accelerator Laboratory\*, M & K\*\*, Dong-A Hitech\*\*\*

**Abstract** - 기존의 펄스 초 레이저를 이용하여 발생시킨 테라 헤르츠 광원의 한계를 극복하기 위하여 대용량의 가속기를 이용한 테라 헤르츠 광원의 발생에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 포항방사광 가속기연구소에서도 펄스 초 테라 헤르츠 빔을 이용한 분광학적인 방법을 사용하여 단백질 접합과 DNA-단백질 간 상호작용, 화학적, 생물학적인 반응 동역학 등에 관한 연구와 영상 기술개발 등을 할 계획을 가지고 펄스 초 테라 헤르츠 빔 라인을 건설 중에 있다. 펄스 초-테라 헤르츠 빔 라인의 마이크로웨이브를 가속하는 장치에 사용되는 전원장치의 설계와 제작 및 시험과정을 외국기술에 의존하지 않고 순수 국내기술로 실현하였다. 본 논문에서는 펄스 모듈레이터의 설계와 실험결과를 보이고자 한다.

**1. 서 론**

테라헤르츠(THz) 파는 마이크로파와 적외선 사이에 놓여 있는 0.1-10 THz 범위의 마이크로파나 광파가 투과할 수 없는 물질을 쉽게 투과하고 수분에 잘 흡수되는 특성을 가지고 있다. 또한, THz파는 전기적 측면에서 보면 물질투과성을 갖는 최단파장 대역에 있고, 실용적 측면에서 보면 적용 가능한 공간 분해능을 활용하여 물질의 투시 이미지를 얻는데 이용 가능하다. 또한 광파 똑같은 방식으로 취급하기 쉬운 이점도 있어서 광학렌즈와 반사경 등의 광학부품을 사용하여 광학계를 구축하거나, 공간 내의 일정거리를 점프하여 이동(운반)시키는 것도 가능하다. 그리고 최근 분광 진단응용 및 이미지 진단응용을 시작으로 다양한 응용 가능성이 제안되고 있다.<sup>[1]</sup> 그러나 펄스 초 테라헤르츠 빔 라인용 장치의 국내제작이 어렵고 대부분 외국기술에 의존하고 있는 실정이다. 포항가속기 연구소에 설치되는 펄스 초 테라헤르츠 빔 라인용 전자가속기의 고주파 증폭기의 전원으로 사용되는 모듈레이터의 설계와 제작 시험 설치를 순수 국내기술로 이룩하고자 한다. 펄스 초 레이저에 의한 THz 파의 발생은 피코초 이하의 짧은 주기의 펄스 형태로 펄스초의 안정된 빔 전압을 요구하는 가속장치에 필요한 전원은 우선 흔들림이 없어야 하고 장시간 운전했을 때 재현성이 있는 사양을 요구한다.

**2. 본 론**

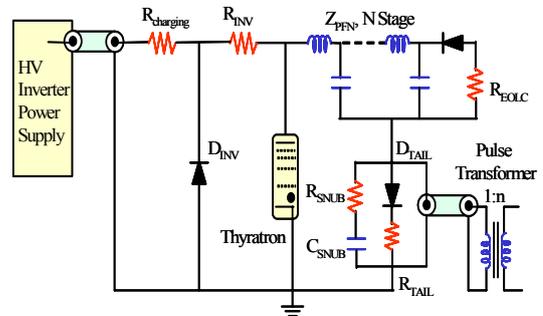
**2.1 펄스 모듈레이터**

마이크로웨이브 증폭관의 전원으로 적용 가능한 모듈레이터는 펄스 빔 전압의 안정도는 100 ppm을 요구한다. 커패시터에 전압을 충전하고 방전에 의해 생성되는 펄스전압의 크기가 일정해야 출력전압도 안정되게 된다. 마이크로웨이브 증폭관인 클라이스트론 튜브에 펄스전압으로 전력을 변환하는 장치인 모듈레이터의 구성은 그림 1과 같다. 다수의 인덕터와 커패시터를 직. 병렬로 연결하고 여기에 직류전원을 충전한 다음 방전스위치와 펄스변압기를 이용하여 부하인 클라이스트론에 펄스전압을 제공 하게된다. 이 장치의 구성은 직류전원을 생성하는 충전부와 저장된 에너지를 방전하는 방전부로 나뉘진다. 부하임피던스와 동일한 임피던스가 되게 설계되어야 하며 이러한 전원을 라인타입 또는 소프트타입이라 부른다. 펄스를 성형하는 회로의 에너지 저장 커패시터에 전압을 충전한 다음 방전스위치에 의해 부하로 전달되는 전압은 충전전압의 절반전압으로 된다. 충전 시에는 병렬형태로 되고 방전 시에는 부하와 직렬로 되어 전압이 분압된다. 모듈레이터를 구성하고 있는 부품들은 대부분 고압부품으로 설계 시에 방전이나 코로나 현상으로부터 절연을 견딜 수 있는 절연거리와 확보와 부품의 배치가 중요하다.

**2.1.1 인버터 방식의 모듈레이터**

클라이스트론 튜브에 펄스형태의 마이크로 웨이브를 공급하는 전원장치는 고전적인 방식의 정류기를 사용하여 직류를 저장하고 이것을 공진 인덕터를 이용하여 공진 충전하여 펄스에너지 저장하는 펄스성형회로

의 커패시터에 2배의 전압을 충전하는 방식을 사용하고 있다. 이 방식의 경우는 커패시터에 충전되는 전압의 크기를 일정하게 할 목적으로 공진 인덕터에 2차 권선을 만들어서 스위치에 의해 2차에 흐르는 전류를 단속함으로써 1차측에 충전되는 전압의 크기를 제한하는 방법을 사용하고 있다. 전압을 안정하게 제어하는 De-Q'ing회로는 출력전압의 안정도가 변범위가 좁고, 2차에서 단속하는 전류는 실제 전력으로 변환 되지 못하고 저항에서 열로 소비되어진다. 그에 비해 한 단계 진보한 인버터 전원을 채용한 모듈레이터는 고주파의 용량이 각각 다른 인버터를 2대를 병렬로 운전하고 이를 충전주기에서 동작구간을 정하여 달리 운전을 하게 된다.



**<그림 1> 모듈레이터회로와 인버터시스템**

인버터 전원방식을 적용한 모듈레이터 장치의 설계에서 중요한 변수로는 충전회로에 흐르는 전류의 크기는 수 암페어이지만 방전회로에 흐르는 전류는 수 kA로 부품의 선정이 중요하다. 운전 반복율이 높아 평균 전력도 크게 되므로 장치나 고가의 부품을 보호할 목적으로 삽입하는 보호회로의 설계도 중요하다. 표 1은 모듈레이터의 사양이다.

**<표 1> 모듈레이터 파라메타**

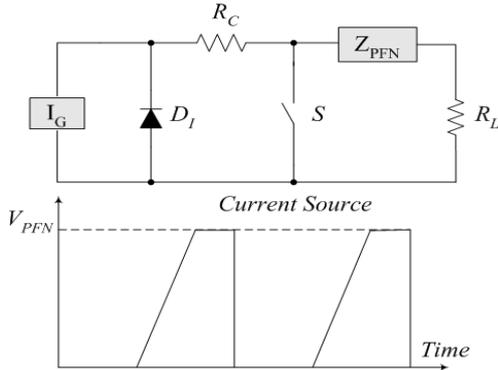
Parameter	Value
Peak Power	160 MW
Peak Beam Voltage	370 kV
Peak Beam Current	430 A
Pulse Repetition Rate	
- Operating	30 Hz
- Maximum	60 Hz
Pulse Width(Flat top)	4.7 μs
Pulse Flatness	± 0.5 %
PFN Impedance	2.93 Ω
Pulse Rise Time	0.8 - 1.0 μs
Pulse Fall Time	1.5 - 2.0 μs

**2.2 정밀 인버터의 설계**

정 전류를 공급하는 고주파 인버터 전원은 스위칭 파워서플라이로서 L-C 직렬공진에 의한 고주파수의 교류전압을 생성한다. 부하전류가 일정하며 커패시터 용량이 따라 충전시간이 달라진다. 병렬로 연결하여 출력전류의 크기를 높게 하면 충전시간도 빨리할 수 있고 용량에 따라 적절하게 용량을 만들 수 있다. 그림 2는 정 전류 인버터 전원의 충전주기와 적용회로의 전반적인 블록을 나타낸 것이다. 교류의 저전압을 입력으로 직류전원을 저장하는 입력부와 고주파의 교류로 변환하는 인버터부, 고전압을 생성하는 고주파 변압기와 다단의 권선에 연결되는 정류다이오

드로 구성된 고전압부로 되어있다. 출력전압의 제어는 기준전압인 레퍼런스 값과 출력전압을 비교하여 목표 전압에 다르면 인버터 스위치를 정지하도록 되어있다. 충전을 개시하도록 지령 충전을 하는 신호는 온 오프의 금지구간신호와 허용신호로 충전 허용시간에만 충전이 가능하다. 토폴러지는 H-Bridge방식에 의한 PWM전류공진방식을 사용하고 있다.<sup>[2-4]</sup>

입력전압은 480 V, 3상 전원을 인입하여 직류전압의 형태로 직류전압으로 변환이 되고 H-Bridge회로에 의해 교번으로 스위치가 동작하게 되어 매회 스위칭 시에 L-C소자의 고유 시정수에 의해 직렬공진이 일어난다. 인버터 전원의 구성은 삼상의 교류전원을 직류전원으로 충전하는 입력부와 높은 고주파수의 스위칭에 의해 교류전원 형태로 변환하는 인버터부 고주파의 교류전원을 고전압으로 승압하는 고주파 변압기로 2차는 다단의 권선을 갖고 브리지의 정류다이오드로 정류하여 직렬로 연결되어 직류고전압부로 되어있다.



〈그림 2〉 모듈레이터 블록다이아그램

직렬공진 인버터에서 최대 전력 P는

$$P = \frac{1}{2} V_{DC} I_{AV} = \frac{1}{\pi} \frac{V_{DC}^2}{Z} = f_r E_r \quad (1)$$

$$I_{AV} = \frac{2}{\pi} I_p, I_p = \frac{V_{DC}}{Z}, E_r = \frac{1}{2} C_r (2V_{DC})^2 \quad (2)$$

여기서  $f_r$ 는 공진 주파수,  $C_r$ 은 공진 커패시터,  $V$ 는 직류전압,  $E_r$ 는 공진 커패시터의 에너지이다.<sup>[5]</sup>

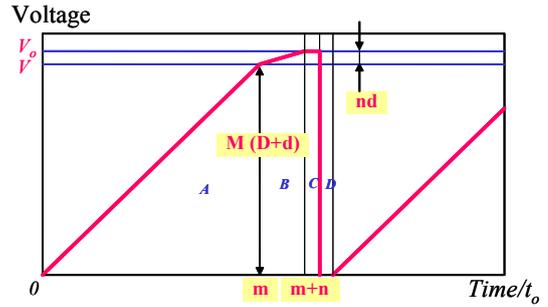
충전전원의 용량이 12 kJ/sec급까지는 공냉에 의한 냉각방식으로 설계되고 그 이상이 되면 수냉에 의한 냉각방식을 사용하고 있다. 상용으로 판매되는 수냉방식은 30 kJ/sec가 최대용량이면 그 이상이 되면 주문자 방식에 의한 특별한 구조로 제작을 하게 된다.

### 2.2.1 정밀제어기 설계

고주파 스위칭을 이용한 인버터 출력전압의 높은 안정도를 유지하기 위한 방법으로 용량이 다른 전원을 병렬로 사용하는 방법을 사용하였다. 그림 3은 다수의 인버터를 병렬로 연결하고 충전구간을 설정한 다음 구간별로 충전되는 형태를 표현한 것이다. 충전시간동안은 인버터 전원의 전 출력을 출력하고 목표로 하는 전압의 목표점에 다르면 98 %에서는 용량이 적은 인버터 전원만 사용하여 고주파 스위칭에 의해 작은 전압을 제어함으로써 안정되게 할 수 있다. 모듈레이터는 펄스에너지를 저장하는 커패시터와 방전회로를 포함한 펄스커패시터와 부하클라이스트론의 등가회로는 복잡한 형상을 하고 있다. 전체 충전시간  $T_c$ 와 충전전압  $V_o$ 는 아래의 주어진 (3)에서

$$\begin{aligned} (m+n) t_o = T_c, m(D+d) + n d = V_o, n d = j D, \\ m+n = a, m^2 - a m + (a+b) j = 0 \quad (3) \end{aligned}$$

여기서  $t_o$ 는 인버터의 스위칭 시간  $m$ 은 coarse 충전전원의 전체 스위칭시간이고  $n$ 은 coarse 충전 후 fine의 스위칭 시간이다.  $a = T_c / t_o$ ,  $b = V_o / d$ , 는 fine 충전스텝  $d = I_f t_o / C$ , coarse 충전스텝  $D = (I_c + I_f) t_o / C$ ,  $C$ 는 부하 커패시턴스,  $I_f$ 는 fine 인버터의 충전전류,  $I_c$ 는 coarse인버터의 충전전류,  $j$ 는 fine 인버터와 충전스텝 coarse 충전스텝의 횡수이다.



〈그림 3〉 병렬운전주기

Fs-THz 모듈레이터 파라메타 PRR = 60 Hz,  $f_r = 41.6$  kHz,  $V_o = 50$  kV,  $C = 0.8 \mu F$ ,  $j = 0.06$ ,  $\beta = 10,400$ . 따라서  $T_c = 14.87$  ms로서 1 ms 데드타임은 충전 레플레이션과 스위칭 회복시간,  $t_o = 24.04 \mu s$ ,  $a = 625.6$ ,  $P_{av} = 60$  kJ/sec. 메인 인버터의 충전전류,  $I_c$ 는 2.5A, 와 fine 충전전류,  $I_f$ 는 0.16 A이다. 메인 충전용량,  $P_c$ 는 62.5 kJ/sec, fine 충전용량,  $P_f$  is 4.0 kJ/sec이다. 또한, 게이트 신호는 간헐적으로 충전의 마지막부분에서 충전 양에 따라 전압의 크기를 결정하게 된다.<sup>[6-7]</sup>

충전 레벨은 지연 시간동안에 전압강하와 증가를 반복하게 된다. 충전 레벨은 모의실험에서 4.4 Vp-p 값을 가지는 것으로 확인 되었다.

### 3. 결 론

기존의 광원에 비해 가속기를 이용한 테라 헤르츠 광원은 마이크로 웨이브 증폭관에 전원의 대부분을 수입에 의존하고 있다. 밝고 안정된 광원을 얻기 위해서는 전원의 출력안정도가 100 ppm정도로 재현성 있는 제어가 요구된다. 이러한 요구를 만족하는 전원설계와 제작 그리고 시험의 모든 공정을 순수 국내기술로 이룩하였고, 장치의 국산화를 이룩하였다. 연구동기와 배경으로 제시되었던 고 정밀 전원장치의 출력안정도를 100 ppm이하로 제어하는 정밀제어기와 제어 알고리즘을 개발하였다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 윤두협, 유용구, 광민환, 류한철, 이승권, 정세영 “테라헤르츠 이미징과 안전·보안 분야 응용,” 전자통신 동향분석, 제21권 제6호, 2006. 12. pp.146-156
- [2] R. E. Tartler, *Solid-State Power Conversion Handbook*, Wiley, 1993, p.528
- [3] A. C. Lippincott, R. M. Nelms, "A Capacitor-Charging Power Supply Using a Series-Resonant Topology, Constant On-Time/Variable Frequency Control, and Zero-Current Switching," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 38, No. 6, pp. 438-447, December 1991.
- [4] E. E. Bowles et al. "A High Power Density, High Voltage Power Supply for a Pulsed Radar System," Conference Record of the 1994 Twenty-First International Power Modulator Symposium, pp. 170-173, 1994.
- [5] J. S. Oh, S. D. Jang, Y. G. Son, M. H. Cho, W. Namkung, "Development of a Capacitor-Charging Power Supply for a Smart Modulator," The Second Asian Accelerator Conference (APAC'01), pp719-721, Beijing, China, September 17-21, 2001
- [6] 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), Stanford University, CA, USA, August 21 - 26, 2005
- [7] J. S. Oh, S. D. Jang, Y. G. Son, S. J. Kwon, J. H. Seo, I. S. Ko, W. Namkung, "Ultra Stable Charging Power Supply for PAL XFEL," 2005 KAPRA & KPS/DDP Joint Workshop, July 8-9, 2005