

Electron Beam Gun 구동을 위한 고전압 펄스 전원장치 개발

박 재안*, 이 용운, 박 성태, 이 경수, 정 병웅
(주) 포스콘 기술개발부문

Development of High Voltage Pulse Power Supply for Electron Beam Gun

Park Jae An*, Lee Young Wun, Park Sung Tae, Lee Kyeong Soo, Jeong Byung Ung

Abstract - 본 논문에서는 입력부, 특고압 발생부 및 고압 정류부, IGBT Pulse Switch로 구성된 Gyro-klystron용 대전력, 고전압, 전류 펄스 전원장치의 설계 및 개발에 대하여 기술하였다. 대전력, 고전압, 전류 펄스 전원장치를 위한 각 구성 부분의 제어 및 설계 특징은 다음과 같다. 입력부인 IGBT Inverter는 펄스 전원장치의 전압 제어를 위하여 출력 고전압을 Feedback System 제어에 의해 Pulse 설정 전압을 갖도록 제어하며, 또한 Pulse 출력중에 직류 고전압부의 전압강하, 즉 Pulse 전압의 Drop이 커지는 것을 방지하기 위하여 Fast Dynamics를 갖도록 Feedback System을 구성하였다. 3대의 단상 특고압 승압변압기가 직렬로 구성된 특고압 발생부는 PWM된 전압을 입력받아 특고압으로 승압시킨다.

특고압 변압기는 고압 Pulse성 전압과 매우높은 dV/dt 전압이 인가되므로 Stray Capacitance가 최소가 되어야 하며 절연파괴로부터 보호될 수 있어야 한다. 고압 정류부는 Inverter와 특고압변압기에 의하여 전원이 공급되므로 교류전압의 교번순간에 매우 높은 전압 변동률을 가지는 Fast Recovery High Voltage Rectifier로 설계, 제작되어졌다. Pulse Switch인 IGBT Switch는 Gate Driver에 의해 구동되어 진다. 주어진 Pulse 사양을 만족시키며 특히 소자의 전압 특성을 고려하여 120KV의 전압값을 갖도록 설계, 제작하였다. 본 논문에서는 고전압 펄스 전원장치 각 부분의 설계에 대하여 기본적인 사항들을 제시하며, 실험결과를 통하여 제안된 방식의 우수한 특성을 입증한다.

1. 서 론

800KW, -80KV, 10A, Pulse Width 5 μ s ~ 500ms의 대전력 펄스 전원장치가 기초과학연구원 연구소 대형공동연구기기부에서 실시하고 있는 한빛장치의 플라즈마 연구부문에 사용되기 위하여 설계, 제작되었다. 특히 본 전원장치는 부하의 운전을 안정화 하기 위하여 Pulse 전압 출력시 전압 Drop을 최소로 하며 Pulse의 Overshoot, 상승시간 및 Pulse Top Ripple을 최소로 하여야 하는 조건으로 교안정도 및 교신뢰성이 요구되고 있으며, 이는 매우 중요한 사항들이다. 위와 같은 요구사항들을 만족하기 위해 입력부 및 전체적인 Pulse의 제어를 위하여 Fast Dynamic 특성을 갖는 IGBT Inverter 방식을 채택하였다. 3대의 Inverter를 직렬 연결하여 각 Inverter간 120의 위상변이제어로 Three Phase Chopper 방식이 구현되어 출력측에서 고조파 특성 및 Ripple이 적은 DC 전압을 얻을수 있으므로 출력 Pulse 특성이 우수하다.

고전압 발생부, 에너지 저장부의 설계는 Compact화된 절연설계와 매우높은 전압변동률에 대한 방안으로

Fast Recovery Rectifier Diode를 적용하였다. Pulse Switch부에는 기존 Tube 방식에서 가지고 있는 전압 Drop 등의 문제를 고려하여[1], 반도체 소자 방식을 적용하였으며, 고전압 구동을 위한 절연설계 및 Pulse 발생시 Noise에 대한 문제를 고려하여 IGBT 소자를 적용 설계하였다.

본 논문에서는 대전력, 고전압, 전류펄스 전원장치의 각 부분에 대한 설계 및 시험상의 문제점들을 해결하고, 이러한 방식의 전원장치 성능향상을 위하여 제안을 한다.

2. 본 론

2.1 사양

표 1에 목표로 하는 고전압 펄스 전원장치의 상세한 사양을 제시하였다.

1) Output Parameter

Output Voltage : -80KV
Pulse Output Voltage : -10KV ~
-80KV Continuously Variable
Output Current : 8.2A
Maximum Output Current : 10A

2) Pulse Parameter

P.R.R : Single Pulse(@500ms) to 1000Pulse
(@Pulse Width less than 100 μ s)
Pulse Width : 10 μ s ~ 500ms
Rising Time : Less than 2 μ s
Falling Time : Less than 10 μ s
Ripple Voltage : Less than 1%
Overshoot : Less than 2%(Time 2ms)

표.1 고전압 펄스 전원장치의 상세 사양

2.2 고전압 펄스 전원장치 설계

EBG Gyro-klystron Tube용 고전압 펄스 전원 장치는 사용자가 요구하는 안전에 대한 문제와 높은 신뢰성을 만족시킬수 있도록 가능한한 산업적으로 검증된 이론과 고전압 전원장치가 요구하는 Compact화된 제작기술과 안전을 고려하여 설계되었다. 그림 1에 고전압 펄스 전원장치의 구성도를 제시하였다. 전체 구성도에서는 입력부, 고전압 발생부, 에너지저장부, Pulse Switch부 및 전기적 Crowbar Switch인 Ignitron Tube, 운전의 안전을 요구하는 기계적 Crowbar인 Mechanical Switch부로 구성되어 있다.

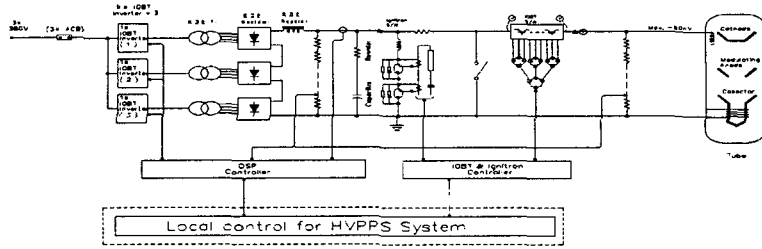


그림 1. 고전압 펄스 전원 장치 구성도

Shop Test시 사용전원은 3상 380V, 100KW의 전원을 사용하였다. 이 전원은 Pulse 출력시 사용전원 용량 부족으로 선로의 이상 발생을 고려하여 독립된 전원을 사용하였으며, 이 전원은 입력전원 차단기(ACB : Air Circuit Breaker)를 거쳐 Inverter에 전원이 공급된다. 또한, 시스템의 안정화를 위하여 주전원과 분리된 별도의 제어전원을 사용 하였다. 다음은 고전압 펄스 전원장치의 주요 구성 부분에 대한 설계 및 제작안을 제시하고 있다.

2.2.1 입력부

지금까지 고전압 전원장치의 입력부는 변압기의 다권선 방법을 주로 채택하여 진공관 방식의 Pulse Switch를 주로 채택하였다.[2] 그러므로 유지, 보수 및 제작상 문제점을 가지고 있다. 본 논문에서는 IGBT Inverter 3조를 직렬 연결하여 유지, 보수의 편의성을 도모하고, 외란에 의한 고조파를 제거하기 위하여 입력 전원부에 AC Filter를 적용 하였다.

고조파 발생을 억제하기 위하여 Diode 정류기 및 Capacitor Filter로 구성된 Inverter 방식의 시스템으로 고조파 발생으로 인한 영향을 줄일수 있었다. 한편, 3대의 Inverter는 각각의 Inverter 출력전압에 대하여 120° 위상변이를 가지고 운전하게 하여, 직류측에서 본다면 증가적으로 Three Phase Chopper로서의 특성을 얻으므로 출력측 고조파 특성이 우수하고 Dynamics 특성이 우수하여, 결과적으로 출력 Pulse 특성이 우수하다.

IGBT Inverter는 출력 고전압을 Feedback System 제어에 의해 Pulse 설정 전압을 갖도록 PWM 제어 하고 특히, Pulse 출력중에 Pulse 전류로 인한 직류 고전압부의 전압강하, 즉, Pulse 전압의 Drop이 커지는 것을 방지하기 위하여 Pulse 출력의 전압까지 Regulation 시킬수 있도록 Fast Dynamics Feedback System을 구성하였다.

2.2.2 고전압 발생부

고전압 발생부는 3대의 특고압 승압변압기 3조, 고속 스위칭 정류기 3조, 특고압 리액터로 구성 되어 있으며, 특히 고압 Pulse 전압 출력을 위하여 매우 높은 dV/dt 전압이 인가 되므로 변압기의 설계, 제작은 Stary Capacitance가 최소가 되어야 하며, 절연 내압이 120KV 이상이 되도록 설계 제작하여야 하므로

고전압 발생부는 유입식을 적용하였다. 특히 특고압 정류 Module의 입력 교류전압은 IGBT Inverter와 특고압변압기에 의하여 전원이 공급되므로 교류전압의 교번 순간에 매우 높은 전압 변동률을 가진다. 따라서 고압 정류부의 Diode는 Fast Recovery High Voltage Rectifier로 설계 되었다. Fast Recovery Diode String로 구성된 특고압 정류 Module은 각 Diode간 분압이 균형있게 이루어 지도록 설계, 제작하여 Reverse Voltage Breakdown으로 인한 Diode String의 연쇄 파손을 방지 하도록 하였으며, 각 특고전압 정류 Module은 직렬 결선하여 80KV 직류 특고전압을 얻을수 있도록 설계 하였다. 식 1) 은 Diode Snubber의 저항 용량 계산 식이다.

$$W = 1/2(C \times V^2 \times f \times 2) \quad \text{식1)}$$

2.2.3 에너지 저장부

Capacitor Bank 는 Oil Capacitor를 직렬 결합하여 구성하였다.

특히 Capacitor를 직렬 구성할 때 Capacitor 개개의 정격 Working Voltage를 초과하지 않도록 균등전압 분배가 적용되었으며, 개개의 Capacitor Working Voltage 및 Insulation Voltage의 안전도를 고려한 절연 구조물을 설계, 제작하였다. 일반적으로 고전압 제품이 그러하듯 기중방식의 경우 제작상 전기회로 특정 부위의 Corona 및 Arc가 발생 하지 않도록 제작하여야 하는데 본 장치에서는 절연 구조물 하단은 도전성 Plate로 제작하여 접지하며, 특고압 정류부 양단에는 Voltage Sensor를 두어 전압 제어를 위한 Feedback Signal로 이용할 수 있도록 설계 반영하였다.

이때 Voltage Sensor의 Band Width가 좁으면 Pulse 출력시 전압 오차가 커지고 Overshoot가 크게 발생 할 수 있으므로 High Frequency Band Side에서 Wide Band Width를 갖도록 설계 하였다. 또한 Voltage Sensing Signal은 1.0V/10KV의 신호 크기로 Low Voltage Bushing Side를 통하여 검출함으로써 전압 검출시 절연에 대한 문제를 해결 하였다.

2.2.4 펄스 스위치 부

고전압 Pulse 전원장치에서 Pulse 출력을 위한 스위치는 지금까지 진공관 Tube를 많이 사용하여왔다. 진공관 Tube를 사용할 시 문제점으로는 Pulse On시

전압 강하로 인한 열손실 및 이것을 냉각하기 위한 냉각 장치가 필요하며 또한 사용회수가 제한되는 문제점으로 인하여, 고속스위칭이 가능하고 전압강하를 줄일수 있는 반도체 소자 IGBT 를 적용하였다.

그러나 반도체 소자 적용시 고려할 사항으로는 회로 내압에 적합한 전압을 얻기 위하여 많은 수의 소자를 직렬 연결하여 회로 내압을 보장할 수 있어야 한다. 따라서 본 논문에서는 IGBT 1Unit 당 7개로 제작된 20 Units를 직렬 연결하여 적용 하였으며, 사진 1은 IGBT Switch Unit를 나타내었다.

Pulse 가 Off 되어 있는 동안에 IGBT Switch는 Bias Supply에 의해 Cut Off 상태에 있게 되고, Pulse On 되었을 때 부하량에 따른 부하 전류에 의해 Capacitor의 에너지가 초기 방전되며, 설정된 Pulse 값을 출력하게 된다.

식 2는 에너지 저장부에 충전된 에너지를 이용하여 초기 Pulse On 시 방전 시간을 나타내는 식이다.

$$T = \sum C / [Vd \times Id](s) \quad \text{식 2)}$$

비정상적으로 IGBT Switch가 Off되지 않아 Pulse 폭이 Setting치 보다 증가 되거나, 직류고전압 전원이 과충전되면 설비 Shut Down 및 Crowbar Switch가 동작되어 출력을 차단 시킨다.

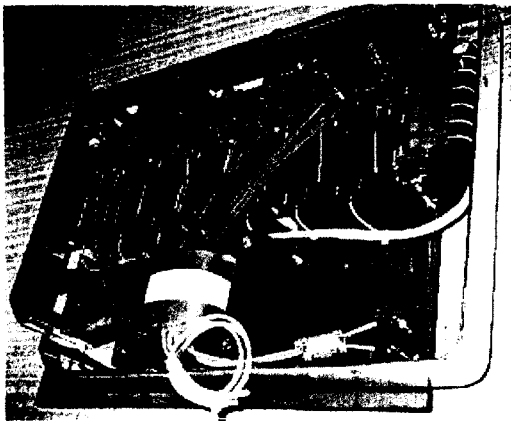


사진 1 . IGBT Switch Unit

3. Shop Test 결과

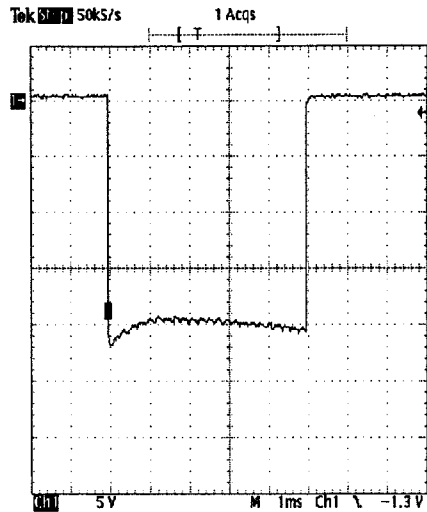
Shop Test시 사용 부하는 1KW, 200Ω, 80개의 저항 부하를 용도에 따라 직,병렬 연결하여 사용 하였다.

그림2는 80KV, 5ms Pulse 운전시의 전압을 나타내고 그림3은 Foil Test 결과 파형이다.

4. 결 론

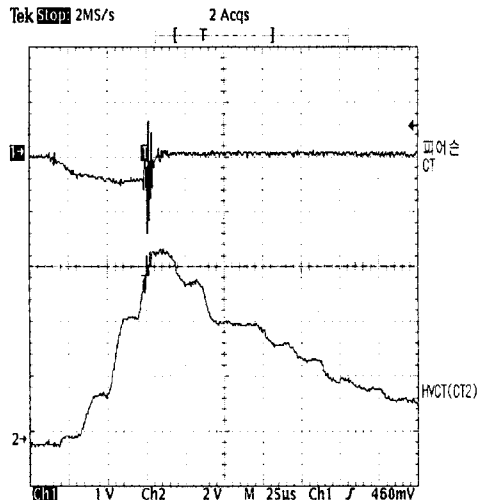
본 논문에서는 EBG Gyrokystron Tube용 고전압 펄스 전원 장치의 설계 및 실험 결과에 대하여 제시 하였으며, 고전압 펄스 전원장치에서는 부하의 이상이나 전원장치의 이상시 선로에너지를 최대한내 소모시키고 Tube 보호를 위하여 빠른 차단시간이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 Crowbar Switch인 Ignitron Tube를 적용하여 고속차단이 가능한 결과를 얻을수 있었다.

현재 Tube 시운전을 준비중에 있어 그 시험결과등은 추후 발표하도록 하겠다.



2 Aug 1999
14:36:50

그림 2. Pulse OutPut Voltage(80KV, 5ms)



Note
1) Ch1: 피어슨 CT 출력파형
2) Ch2: HVCT 출력파형

그림 3. Foil Test 파형

[참 고 문 헌]

- [1] M.Tsuneoka, "Development of d.c power supply for gyrotron with energy recovery system", Fusion Engineering and Design, 36, 461-469, 1997
- [2] W.Schmincke and N.Tomljenovic, "Regulated high voltage power supply for gyrotrons based pulse step modulation technology"
- [3] 박재안, 이용운, 박성태, 이경수, "Development of High Voltage Pulse Power Supply for Electron Beam Gun", 전력전자연구회, III-A-26 ~ 30, 2000