

IGBT를 사용한 고전압 스위치에 관한 연구

박 성 수*, 김 성 철, 조 무 현, 남 궁 원
포항공과대학교 가속기연구소

Study on High Voltage Switch Using IGBT

S.S. Park*, S.C. Kim, M.H. Cho, W. Namkung
Pohang Accelerator Laboratory, PLS/POSTECH

Abstract

PLS 2-GeV linac has 11 sets of high power klystron-modulator system as a main RF source for the beam acceleration. The modulators can provide 200-MW peak pulsed power(400-kV, 500-A) with a pulse width of 7.5 μ s (ESW), a maximum pulse repetition rate of 120-Hz at the full power level. The DC power supply provides a 25-kV, 7-Adc and the charging system consists of a charging inductor, charging capacitor, and the diode for reverse current protection. The charged PFN voltage by a LC resonant charging method has two times of the DC high voltage and the pulsed power is delivered to the load by a thyratron switch. To reduced the press of high voltage at thyratron switch, the command charging is the best method. In this article, the high voltage switch for the command charging method is tested to the start work and the system is presented with the experiment results of the trigger and operational characteristics.

1. 서 론

포항 가속기 연구소 선형가속기는 2GeV의 전자에너지 를 얻기 위해서 최대 평스출력 200MW 모듈레이터 11 세트를 운전 중에 있다. 200MW 모듈레이터는 80MW 금 클라이스트론 증폭기의 전원공급장치로서 직류전원부, 충전부와 방전부로 나눌 수 있으며 첨두출력이 최대 400kV, 500A, 120pps, 평스폭 7.5us (ESW)의 평스전원을 공급한다. 직류전원부는 3상 480V를 승압 후 정류기를 통하여 25kV, 7Adc 직류전원을 공급하며 충전부는 충전 인덕터, PFN용 캐퍼시터와 역전류 흐름을 방지하는 다이오 드로 이루어진다. LC 자동공진충전에 의해서 PFN에 직류전원 전압의 2배로 충전이 되며 충전된 전압은 대용량 싸이라트론 스위치를 통하여 부하인 클라이스트론에 평스 트랜스포머를 통하여 전달된다. 특히 모듈레이터 시스템에 사용하고 있는 대용량 싸이라트론 스위치의 고전압 부담을 경감하기 위해서 지령충전방식 이 가장 적합하며 아울러 싸이라트론 오동작에 따른 고전압 충전 부의 과부하를 방지할 수 있는 장점이 있다. 본 논문은 지령충 전을 위한 고전압 스위치 개발을 목적으로 1.2kV, 300A의 IGBT 소자를 이용하여 시작품으로 제작된 내압 3kV급 반도체 스위치 의 트리거 및 동작 특성에 관한 연구에 대하여 논하고자 한다.

2. 본 론

200 MW 모듈레이터의 LC 자동공진 충전방식은 충전 캐퍼시터가 방전된 후 자동 충전되므로 고전압 싸이라트론 스위 치에 고전압이 인가되어 있는 시간이 많아진다. 따라서 고전압 싸이라트론 스위치의 오동작 발생률이 증가하여 모듈레이터 시스 템의 운전시간이 감소하는 요인이 되어왔다. 따라서 고전압 싸이라트론 스위치에 고전압이 인가되어 있는 시간을 줄이는 방식으로 지령충전방식을 도입하고자 한다. 표 1은 200MW 모듈 레이터의 LC 자동공진 충전 사양을 보인다.

표 1 200MW 모듈레이터의 LC 자동공진 충전 사양.

Table 1 LC Resonant Charging Specification of
200MW Modulator.

200MW 모듈레이터	
직류전원	25kV, 7Adc
충전시간 (ms)	5.75
충전 방식	LC 자동공진충전
충전 인덕터	2.4H, 직류 25.7kVMax, 18Apeak
충전 캐퍼시터	1.4 μ F, 50 kV
부하(Ω)	2.8 (클라이스트론)
방전용 스위치	싸이라트론(50kVpeak, 10kApeak)

2.1 LC 자동공진 충전방식

200 MW 모듈레이터의 충전부는 그림 1에 보여준 것과 같이 충전 인덕터와 충전 다이오드, 디스파이킹 인덕터, PFN 캐퍼시터, De-Q'ing 회로로 구성된다. 충전부는 직류 전원공급 장치로부터 25kV의 직류전압을 공급받아 충전 인덕터(2.4H, 12.5A)와 PFN 캐퍼시터(0.05 μ F, 50kV, 28개 병렬)의 LC 자동공 진 충전으로 직류전압의 2배로 PFN 캐퍼시터에 충전을 하며 역 전류의 흐름을 방지하기 위하여 충전인덕터와 PFN 캐퍼시터 사이에 충전용 다이오드를 사용하고 있다. PFN 캐퍼시터에 충 전되는 LC 자동공진 전압과 충전시간은 다음과 같이 표현된다.

$$T_C = \frac{\pi}{\omega_c} = \pi \sqrt{L_c C_{PFN}}$$

$$V_{PFN} = V_{DC}(1 - \cos \omega_c t)$$

$$\omega_c = \frac{1}{\sqrt{L_c C_{PFN}}}$$

단, ω_c : 공진 충전 주파수, L_c : 충전 인덕터,
 C_{PFN} : 총 PFN, V_{DC} : 직류전압

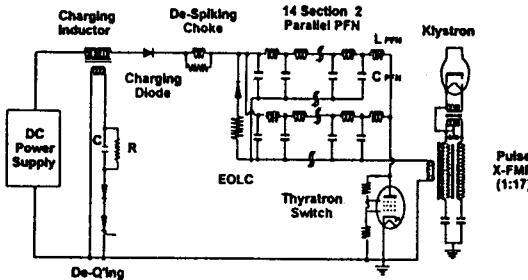


그림 1 200 MW 모듈레이터의 LC 자동공진 충전회로.
Fig. 1 LC Resonant Charging Circuit of 200-MW Modulator.

LC 자동공진 충전방식에 의해 충전되는 캐패시터 전압파형은 그림 2보인다. V_{DC} 는 직류전압, $V_C=2V_{DC}$ 는 캐패시터의 충전전압, t_0 는 LC 자동공진 충전 시의 충전전류, t_1 은 LC 자동공진 충전의 시작 시점, t_2 는 LC 자동공진 충전의 완료 시점, t_3-t_4 는 대출력 싸이라트론 스위치에 고전압이 인가되어 있는 시간, t_5 는 고전압 싸이라트론이 점호하는 시점이다.

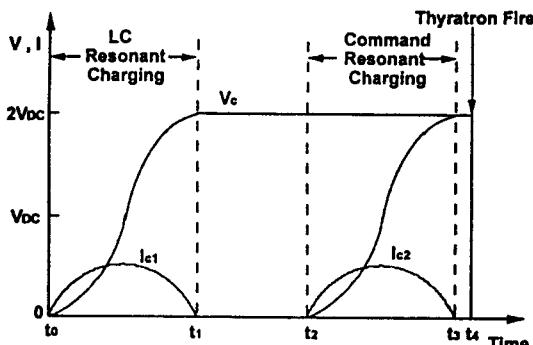


그림 2 LC 자동공진 충전과 지령충전의 전압 파형.
Fig. 2 Voltage Waveform of LC Resonant Charging
and Command Charging.

2.2 지령충전방식을 위한 IGBT 소자의 특성시험

고전압 싸이라트론의 전압부담을 경감하기 위해 도입하고자 하는 지령충전방식은 직류전원부에서 공급되는 직류전압을 LC 공진 충전할 때 충전인덕터와 PFN 캐패시터 사이에 점호와 소호가 가능한 반도체 스위치를 삽입하여 고전압 싸이라트론 스위치에 고전압이 인가되어 있는 시간을 줄일 수 있도록 반도체 스위치에 점호와 소호의 지령을 주는 방식이다.

지령충전에 의해 캐패시터에 충전되는 전압파형을 그림 2에 보인다. I_{C1} 는 지령충전 시의 충전전류, t_5 는 지령충전의 시작 시점, t_6 는 지령충전의 완료 시점, t_7 는 LC 자동공진 충전방식과 동일하게 고전압 싸이라트론이 점호하는 시점이다. 지령충전방식에서 원하는 전압으로 충전되기 전에 방전 스위치의 동작으로 방전이 될 경우 시스템의 출력은 변동하게 된다. 따라서 일정한 출력을 얻기 위해서 방전이 시작되기 전에 원하는 전압으로 충전이 되어야 한다.

지령충전방식에 사용할 예정인 IGBT의 소자특성을 시험하기 위해 그림 4와 같이 회로를 구성하였다. 회로에 사용된 IGBT 소자는 1.2kV, 300A로서 6개를 직렬로 연결하였으며 저항(2Ω, 100W)을 부하로 사용하였다. 지령충전방식에 사용할 수 있는 고전압 스위치의 조건은 첫째로 반도체 소자에 게이트 트리거가 동일한 시간에 인가되어 하며 반도체 스위치의 점호, 소호 특성이 동일해야 한다. 둘째로 게이트 트리거 폴스폭을 수ms 까지 안정한 동작조건에서 조정이 가능하여야 한다.

IGBT가 점호 및 소호를 할 경우 구동저항은 전압의 상승시간과 하강시간을 결정해준다.

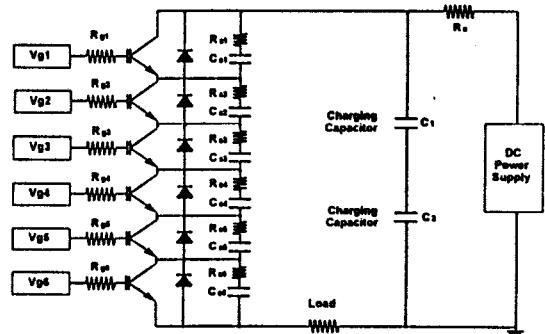
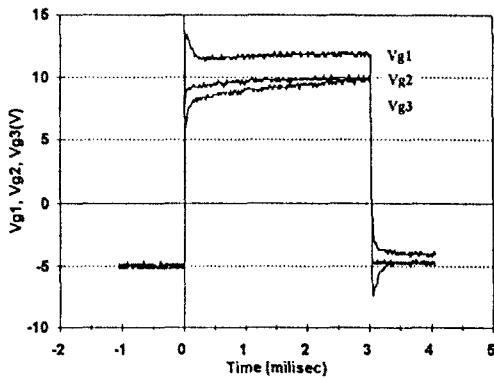


그림 4 IGBT 소자의 특성 시험회로.
Fig. 4 Characteristics Test circuit of IGBT devices.

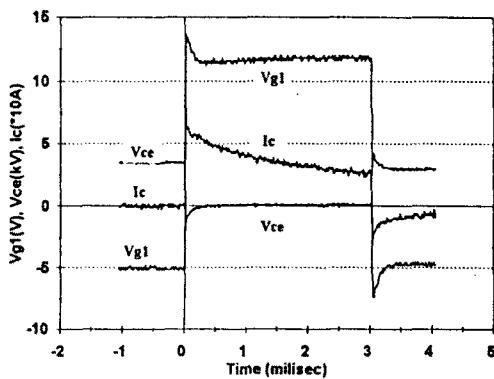
3. 실험 결과

지령충전방식에 사용하기 위한 고전압 스위치로 1.2kV, 300A급 IGBT 소자를 직렬로 그림 4와 같이 회로를 구성하였으며 부하로 저항을 사용하였다. 회로에 사용된 부하는 2Ω, 100W의 저항으로 직류전원에 IGBT 소자를 통하여 연결하였다. 여기에 사용한 직류전원은 3kV, 750mA의 전원공급장치를 사용하였다. 게이트 트리거는 +15V, -5V 폴스폭이 3ms를 인가하였으며 각각의 트리거 파형을 그림 5의 (a)에 보인다. 그림 5의 (b)는 IGBT에 트리거를 인가할 때의 전압(V_{CE}), 전류(I_C), 및 게이트 트리거(V_{G1}) 파형으로 트리거 폴스폭이 3ms로서 지령충전방식에 사용할 수 있음을 보였다. RC 스너버에 사용된 저항과 캐패시터는 각각 25Ω, 0.033μF이다.

그림 6은 IGBT 소자의 V_{CE} , I_C , V_{G1} , V_{G2} , V_{G3} , 상승시간 및 점호 시간을 측정한 파형으로 상승시간이 거의 동일하였고 소자의 점호가 동시에 일어남을 보였다. 구동회로에 내장된 구동용 저항에 따라 IGBT의 상승시간과 하강시간을 제시된 범위 안에서 결정해줄 수 있으며 제조사양에 의하면 구동저항이 2.7Ω 일 때 각각 0.6μsmax, 0.5μsmax이다.



(a)



(b)

그림 5 IGBT 소자의 시험 파형.

- (a) IGBT의 게이트 트리거 파형(V_{g1} , V_{g2} , V_{g3})
- (b) IGBT의 전압 및 전류(V_{ce} , I_c , V_{g1}).

Fig. 5 Test Waveform of IGBT Devices.

- (a) Gate Trigger of IGBT (V_{g1} , V_{g2} , V_{g3})
- (b) Voltage and Current of IGBT (V_{ce} , I_c , V_{g1})

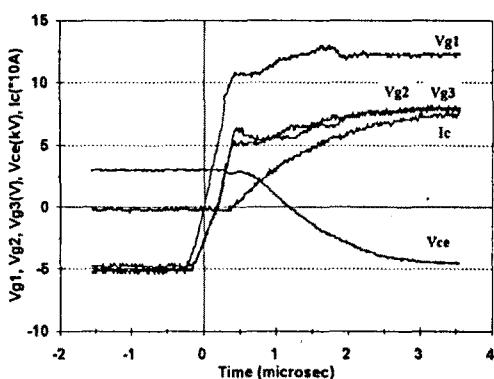


그림 6 IGBT의 상승시간 파형.

Fig. 6 Rise Time Waveform of IGBT.

4. 결 론

LC 자동공진 충전방식으로 사용 중인 200MW 모듈레이터의 고전압 싸이라트론 스위치에 인가된 고전압의 부담을 경감하기 위해서 도입하고자 하는 저령충전방식의 시작품으로 전력용 소자인 IGBT 소자를 사용한 스위치를 연구 개발 중에 있다. 본 논문은 저령충전방식에 사용한 IGBT를 직렬로 연결하여 만족한 결과를 얻었다. 첫째로 동일한 시간에 트리거가 인가됨을 보였으며 IGBT 소자에 3kV의 전압을 인가한 상태로 스위칭하여 양호한 전압과 전류의 과정을 얻었다. 둘째로 게이트 트리거의 펄스폭이 3ms에서도 안정한 스위치 동작을 보였다. 앞으로 200MW 모듈레이터의 저령충전 방식에 사용할 수 있는 수십 kV의 전력용 IGBT 스위치 소자의 개발이 요구된다.

5. 참고 문헌

1. J.S. Oh et al., "200-MW Modulator for 80-MW Klystron, in PLS Electron Linac," 9th IEEE Pulsed Power Conference, Vol.2, Albuquerque, NM, pp.849-852 (1993).
2. M.H. Cho et al., "Klystron-Modulator System Performances for PLS 2-GeV Linac," 1995 Particle Accelerator Conference, Dallas, Texas, May 1-5 (1995).
3. N. Mohan, T.M. Undeland, W.P. Robbins, Power Electronics : Converters, Applications, and Design, John Wiley & Sons Publishing Co., 2nd ed., (1995).
4. GTR Module (IGBT) Application Notes, International Operations, Toshiba Co., (1991).