

## 지령충전을 위한 고전압 반도체 스위치 개발

박성수, 이경태\*, 김상희, 박상욱, 남상훈  
포항공과대학교 가속기연구소

### Development of High-voltage Semiconductor Switch for Command Charging

S.S. Park, K.T. Lee, S.H. Kim, S.W. Park, S.H. Nam  
Pohang Accelerator Laboratory, POSTECH

**Abstract** - To improve the reliability of the klystron-modulator systems, the stable operations of the thyatron an important factor of the system are required. The thyatron always has a possibility of self-fire according to the conditions of the applied high voltage and this induces the system fault. Therefore a command charging method was introduced to reduce the applied time of the high voltage into the thyatron. The high voltage switch used in the command charging method is the SCR (1.6 kV, 50A) and consists of 10 SCRs in series to discharge 10 kV. A pulse transformer was used to apply the trigger pulse. The objectives of this research are the fabrication of the semiconductor switch and the study of the experimental result of the operation characteristics of the high voltage semiconductor switch.

모듈레이터에 설치하여 시험하기 전에 실험 장치를 제작하여 성능 시험을 확인한 후 주 장비에 설치를 할 예정이다. 지령충전스위치(Command charging switch)를 사용하지 않을 경우 싸이라트론의 스위치가 자기점화에 의하여 싸이라트론의 트리거 신호보다 먼저 발생할 경우 싸이라트론의 트리거 신호가 인가되는 시점에서 전원공급장치에서 불 경우에 부하와 병렬로 연결된 싸이라트론 스위치가 단락 되기 때문에 과 전류가 발생한다. 이 전류에 의하여 과 전류 차단기가 동작하거나 과 전류 감지기가 동작을 한다. 이러한 현상을 방지하기 위하여 지령충전스위치를 그림 1과 같은 위치에 설치하도록 구성하였으며 지령충전스위치는 싸이라트론 스위치가 방전한 후 충전되는 시점을 결정함으로써 과 전류가 흐르는 것을 방지해주고 있다.

## 1. 서 론

선형가속기에서 운전중인 200 MW 모듈레이터의 싸이라트론 스위치가 자기 점화로 인하여 시스템이 불안정한 동작을 한다. 따라서 싸이라트론의 안정된 동작을 보장하기 위하여 싸이라트론에 트리거 신호를 인가한 후 다음 충전시점을 결정해 주는 스위치가 필요하다. 이 스위치는 대표적으로 싸이라트론 스위치, 고전압 반도체 스위치 등을 사용하고 있다. 본 보고서에서는 제어 방식이 간편하고 반영구적으로 사용할 수 있는 고전압 반도체 스위치 방식을 도입하여 지령충전 방식을 구현하고자 한다.

## 2.2 스위치 설계

고전압 반도체 스위치를 설계하기 위한 스위치의 기본 사양은 표 1과 같다.

표 1 고전압 반도체 스위치 사양

Parameter	Operating value	Design value
Switching Voltage (kV), $V_{max}$	10	16
Switching Current (A), $I_{rms}$	0.5	50
Number of SCR, $V_{pfn}$	10	10
Voltage of SCR (kV), $V_{max}$	1.6	1.6
Trigger method	Multi-TR	Multi-TR
Trigger voltage/current(V/mA)	25/100	$\leq 2.5/\leq 50$
Trigger pulse width ( $\mu s$ )	300	$\leq 30$

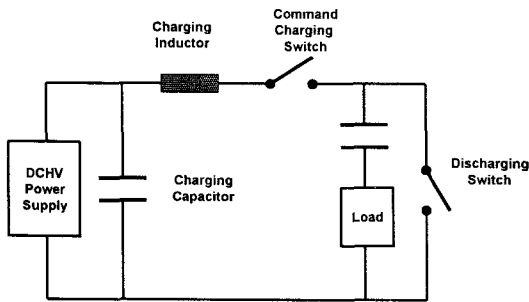


그림 1 고전압 반도체 스위치 시험용 block diagram

## 2. 본 론

### 2.1 지령충전 고전압 반도체 스위치 시스템 회로

고전압 반도체 스위치를 시험하기 위하여 그림 1과 같이 모듈레이터 시스템과는 별도로 시험 시스템을 구성하였다.

일반적으로 약 5 kV 이상의 고전압을 전달 수 있는 반도체 소자가 없기 때문에 저전압의 반도체 소자를 직렬로 연결하여 고전압을 스위칭을 할 수 있는 고전압 반도체 스위치를 설계하였다. 모듈레이터 시스템의 최대 전압은 23.5 kV이고 전류는 18 A이므로 표 1과 같이 전류 용량은 약 2.5배 정도의 값으로 하였으며 고전압을 스위칭 할 경우 스위칭시 발생하는 노이즈로부터 소자를 보호하기 위하여 실제 사용 전압의 약 1.6-2배로 설계하였다. 현재 연구 단계에서는 1.6 kV SCR 10개를 하나의 모듈로 사용하여 고전압 10 kV를 스위칭할 수 있는 모듈로 구성하였으며 설계 전압은 16 kV이다. 표 2는 고전압 반도체 스위치에 사용할 SCR 소자의 사양으로 전압 1.6 kV, 전류 50 Arms의 용량을 갖으며 SCR의 turn on 특성은 실제 시스템의 충전시간이 1.7ms로 충전 인덕터로 제한을 하고있다. 그리고 소자의 di/dt는 150 A/ $\mu s$ 로 설계가 되어있다. 시험 모듈은 표 1에서와 같이 전압 16 kV, 전류 50 Arms로

설계를 하였으며 트리거 펄스는 반도체 소자의 안정된 동작을 보장하기 위하여 25 V, 100 mA, 약 100  $\mu$ s 이상을 인가하였다.

### 2.3 고전압 스위치 회로

지령충전 시스템에 적용하기 위하여 반도체 스위치를 직렬 연결한 고전압 스위치를 그림 2과 같이 설계하였다. 고전압 스위치의 트리거 신호는 IGBT 소자를 사용하여 인가하였고 고전압 부와 신호전원사이에는 펄스 트랜스포머로 절연하였다.

표 2 고전압 스위치에 사용한 반도체 소자의 사양

Parameter	Value
Voltage (kV), Vrms Max	1.6
Current (A), Irms	50
Average Current (A), Iav	25
Surge On-state Current (A), I <sub>tsm</sub> , t=8.3 ms	480
Rate-of-rise of On-state Current (A/ $\mu$ s), di/dt	150
Rate-of-rise of Commutating Voltage (V/ $\mu$ s), dv/dt	1000
Peak Reverse Gate Voltage (V), V <sub>rgm</sub>	10
Gate Trigger Voltage (V), V <sub>gt</sub>	2.5
Gate Trigger Current (mA), I <sub>gt</sub>	50
Turn-off Time ( $\mu$ s), T <sub>q</sub>	60

반도체 소자를 직렬로 연결하여 고전압에서 사용할 경우에 안정된 동작상태와 과도상태에서 발생하는 소자간의 전압 불균등 분배로 인하여 소자가 절연파괴 되는 것을 막기 위하여 전압 분배용 저항을 소자와 병렬로 연결하였다. 이와 같은 목적으로 사용하기 위하여 첫째로 소자의 누설 전류와 점화 시간을 최소화하여야 한다. 그리고 소자의 단락 상태를 확인하기 위하여 분배 저항에 직렬로 발광 다이오드를 삽입하였다.

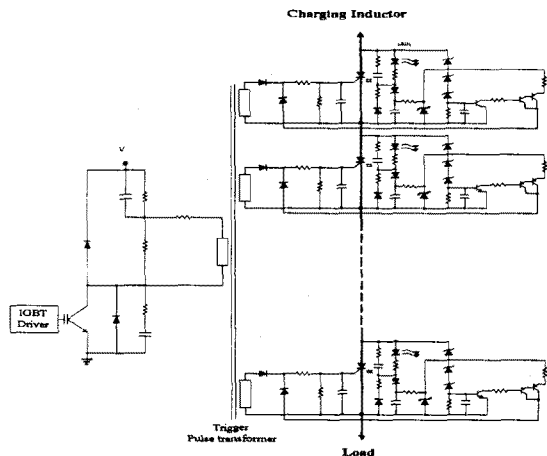


그림 2 고전압 반도체 스위치 회로

둘째로 SCR 소자에 트리거 신호가 인가되지 않을 경우 또는 과도상태에 의한 과전압이 소자에 인가될 경우에 대하여 보호회로를 사용하여 강제로 트리거 신호를 인가

하는 방식을 사용하였다. (1,3) 그림 3과 같이 제너 다이오드(Zener Diode)를 SCR 소자와 병렬로 연결하여 SCR 소자에 인가되는 노이즈 또는 고전압으로부터 소자를 보호하도록 회로를 설계하였다. 보호회로의 위치는 SCR 소자의 애노드와 캐소드 사이에 전류제한용 저항과 직렬로 제너다이오드를 연결하여 구성을 하였으며 SCR 소자에 인가되는 전압이 제너 다이오드의 역전압을 초과할 경우 적은 전류를 감지한다. 여기서 실제 감지되는 신호는 매우 적기 때문에 SCR 소자를 트리거 시켜주기 위하여 트리거 전압까지 증폭하여 사용하고 있다. 증폭회로는 간단한 증폭용 트랜지스터 소자를 사용하였으며 증폭하기 위한 전원으로서는 SCR에 인가되는 전압을 분배 캐패시터로 분배하여 공급을 하고 있다. 특히 과도상태에서 dv/dt에 의하여 발생하는 과전압은 저항과 캐패시터를 사용한 필터를 사용하여 저감시켜주고 있다.

### 2.4 트리거회로

반도체 소자를 직렬로 연결하여 고전압을 스위칭 하는 방식에는 문제점이 많이 있다. 첫째로 트리거회로와 주 스위치 부의 전압차이가 매우 크기 때문에 절연을 해야 하며 둘째로 지터(Jitter)가 적은 동일한 시간에 각 반도체 소자에 트리거 신호를 인가하여야 한다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법으로는 다중 권선식 펄스 트랜스포머와 광파이버 또는 수광소자를 사용하는 방법이 있다. 펄스 트랜스는 트리거 하기 위한 펄스 트랜스의 변환 전력이 충분하기 때문에 SCR에 직접 인가해주는 반면에 절연을 위한 트랜스포머의 부피가 커지고 전압이 커질수록 절연이 어려워진다. 광파이버 소자는 고전압에 관계없이 트리거가 가능하고 부피도 적당하다. 그러나 SCR 소자에 인가될 트리거 전압으로 만들기 위해서 외부전원이 필요하다. 그리고 수광소자를 사용하는 방법은 광파이버와 같은 원리로 동작을 하나 절연 및 전달 매체가 공기중에 노출되므로 충분한 노이즈 대책을 강구해야 한다. 본 과제에서는 트리거 방법이 많이 사용하고 있는 펄스 트랜스포머로 사용하여 SCR 소자에 트리거를 인가하였다. 펄스 트랜스포머는 절연전압과 트랜스의 코아에 의하여 크기가 결정이 되며 몸체와 전선간에 약 10 kV에서는 양호한 것으로 확인하였다. 동일한 시간에 각 반도체 소자에 트리거 신호를 인가할 때 각 소자 사이의 트리거 지터(jitter)를 저감하기 위하여 트랜스포머의 제작에 유의를 하였다.

### 2.5 시험 및 시험결과

지령 충전용 고전압 반도체 소자를 시험하기 위하여 그림 4와 같이 시험 장치를 구성하였다.

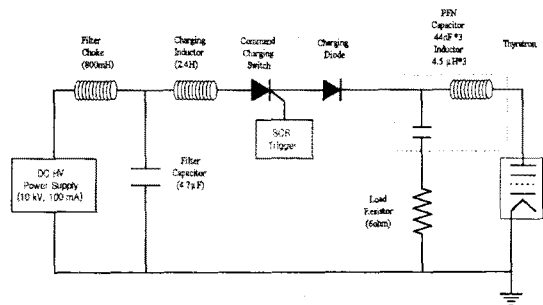


그림 3 고전압 반도체 스위치 시험 회로

좌측은 직류 고전압부이고 우측이 방전부이며 중앙에 충전 시점을 결정해주는 고전압 반도체 스위치와 충전 인덕터가 있다. 그림 3과 같이 고전압 스위치를 설치하였으며 고전압 5 kV를 인가하여 1.7ms의 충전시간 동안

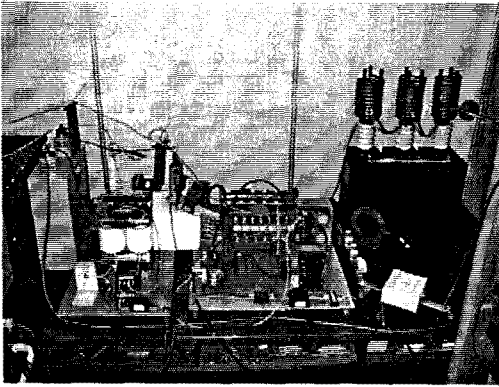


그림 4 고전압 반도체 스위치 시험 장치

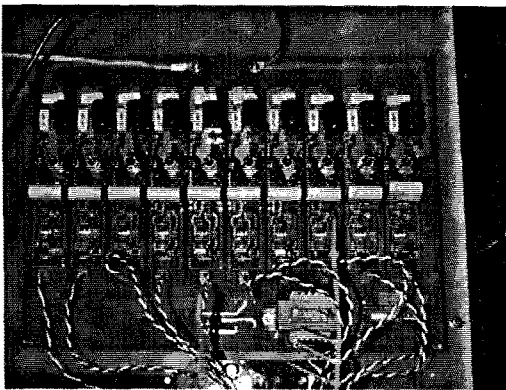


그림 5 고전압 반도체 스위치 모듈  
SCR 1.6 kV, 50 Arms 10개

충전 인덕터를 통하여 PFN 캐패시터에 2배로 충전하도록 설계하였다. 충전 후 사이라트론 스위치를 통하여 저항 부하에 에너지를 전달하도록 하였으며 사이라트론 스위치는 EEV사의 CX1836A 튜브를 사용하였다. 그림 4는 지령충전스위치를 설치하여 시험한 장치 사진이다. 왼쪽은 고전압 전원장치이고 중앙은 지령충전스위치와 트리거 보드이고 우측은 PFN용 캐패시터와 부하 저항이다. 그림 5은 고전압 반도체 소자를 직렬로 연결한 반도체 스위치 보드이다. 고전압 스위치는 SCR 1.6 kV, 50 Arms 10개를 이용하였으며 주변에 RC 스너버 회로 및 보호회로를 포함하고있다. 고전압 스위치는 최대 16 kV, 50 Arms 까지 고전압을 전달 수 있게 설계 제작하였다. 또한 반도체 소자의 단락상태를 판단할 수 있도록 소자와 병렬로 발광 다이오드를 설치하였다.

그림 6은 고전압 반도체 스위치 시험을 위하여 제작한 시스템에서 시험한 파형이다. 지령충전스위치를 사용하지 않을 경우 사이라트론에 의해서 에너지가 부하에 전달된 후 곧 바로 충전하는 전압과 전류 파형을 보이고 있다. 그림 7은 회로에 지령충전스위치를 사용할 경우 PFN에 충전되는 전압 및 충전 전류의 파형을 보인다. 고전압 스위치가 없는 경우 충전시간은 약 1.7 ms이고 충전 전압은 약 10 kV, 충전 전류는 약 1 Apeak이며 고전압 스위치를 사용할 경우 충전시간은 약 1.7 ms이고 충전 전압은 약 10 kV, 충전 전류는 약 0.8 Apeak이다.

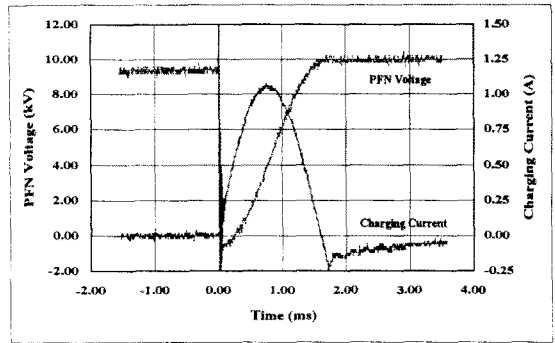


그림 6 지령충전스위치를 사용하지 않은 충전파형

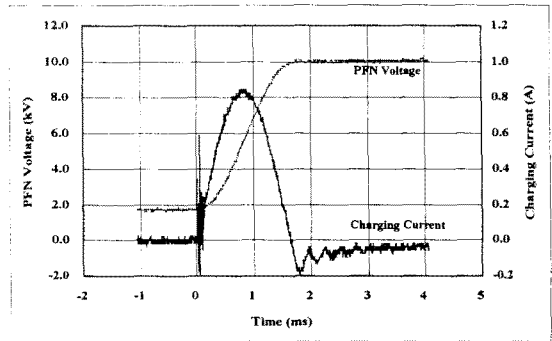


그림 7 지령충전스위치를 사용했을 경우의 파형

### 3. 결 론

고전압 반도체 스위치를 구현하기 위하여 시제품으로 10개의 SCR을 사용하여 한 모듈을 제작하여 시험을 하였다. 지령 충전용 고전압 스위치의 동작 특성을 스위치가 없는 경우와 비교하였으며 10개의 소자로 구성된 고전압 스위치가 원하는 지령충전스위치로서 파형을 통하여 잘 동작함을 볼 수 있었다. 이러한 결과를 토대로 고전압 반도체 스위치가 클라이스트론-모듈레이터 시스템에 설치하여 가동할 경우 현재 30 Hz의 운전 반복횟수를 10 Hz로 낮추어 운전할 경우 전력을 감소시킬 수 있고, 현재 가장 문제가 되는 CB(circuit breaker) 트립(trip)을 방지할 수 있으므로 시스템의 가용도가 향상될 것으로 생각된다. 앞으로 모듈레이터에서 운전 가능한 목표 값으로 전압 25 kV, 전류 50 Arms를 스위칭하기 위하여 3개의 모듈을 제작하여 시험 할 예정이다.

### (참 고 문 헌)

- [1] R. M. Ness, B. L. Thomas, and G. Schofield, "Command resonant charging system for a 350 kW average power line type modulator," 21st International Power Modulator Symposium, Costa Mesa, California, 1994, pp.159-163.
- [2] H. K. Pfeffer et al. "Solid state, 24 megawatt modulators for fermilab's 400 MeV linac," 20th International Power Modulator Symposium, 1992, pp.169-172.
- [3] Herbert M. Lawatsch, Janis Vitins, "Protection of thyristors against overvoltage with breakover diodes," IEEE Transactions on industry applications, Vol. 24, No. 3, May/June 1988, pp. 444-448.