

모듈레이터의 지령충전을 위한 고전압 반도체 스위치 개발

박성수, 이경태, 김상희, 조우현
포항공과대학교 가속기연구소

Development of a High Voltage Semiconductor Switch for the Command Charging o

S. S. Park, K. T. Lee, S. H. Kim, M. H. Cho
Pohang Accelerator Laboratory, Postech

Abstract - A prototype semiconductor switch for the command resonant charging system has been developed for a line type modulator, which charges parallel pulse forming network(PFN) up to voltage of 5 kV at repetition rates of 60 Hz. A phase controlled power supply provides charging of the 4.7 μ s filter capacitor bank to voltage up to 5 kV. A solid state module of series stack array of six matched SCRs(1.6 kV, 50 A) is used as a command charging switch to initiate the resonant charging cycle. Both resistive and RC snubber network are used across each stage of the switch assembly in order to ensure proper voltage division during both steady state and transient condition. A master trigger signal is generated to trigger circuits which are transmitted through pulse transformer to each of the 6 series switch stages. A pulse transformer is required for high voltage trigger or power isolation. This paper will discuss trigger method, protection scheme, circuit simulation, and test result.

1. 서 론

포항공속기연구소에서는 선형가속기의 대전력 에너지 공급원으로 사용하고 있는 클라이스트론-모듈레이터 시스템의 성능 향상 및 운전 신뢰성을 제고하기 위한 일환으로, 모듈레이터의 싸이라트론 스위치의 동작 특성을 개선할 수 있는 지령 충전 방식의 반도체 스위치를 개발 중에 있다. 싸이라트론 스위치는 그 기능면에서 볼 때, 고전압이 인가되어 있는 상태에서 자기 점화(self-fire)를 할 수 있는 조건이 항상 내재되어 있고, 이로 인하여 방전 후 충전 시간 동안 자기 점화로 인하여 모듈레이터-클라이스트론의 가동 중지 또는 소손의 우려가 대두되고 있다. 지령충전 방식의 반도체 스위치는 방전 후 충전시간을 지연시킴으로써 싸이라트론 스위치의 자기 점화 조건을 최소한으로 만들어 주는 기능을 가지고 있으며, 또한 고전압 및 고주파의 출력에 있어서 보다 유연한 스위칭 특성을 가지고 있다.[1] 지령충전 방식의 반도체 스위치는 고전압에 견딜 수 있는 반도체 소자, 직렬 연결 방식의 싸이리스터 등의 부품으로 구성되며, 내전압 약 50 kV, 주파수 60 Hz의 스위칭 기능을 목표로 하고 있다.[2] 본 연구에서는 지령 충전 방식의 고전압 반도체 스위치의 설계 및 구조, 모의 시험, 시제품 제작 및 시험 결과를 보이고자 한다.

2. 본 론

2.1 고전압 반도체 스위치

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 연구에서는 제어 방식이 간편하고 반영구적으로 사용할 수 있는 고전압 반도체 스위치 방식을 도입하여 지령충전 방식을 구현하고자 한다.

2.1.1 스위치 설계

고전압 반도체 스위치를 설계하기 위한 모듈레이터의 기본 데이터는 표 1과 같다. 표 1을 기준으로 반도체

표 1 고전압 반도체 스위치 설계를 위한 모듈레이터 사양
Table 1 Modulator specification for design of high voltage semiconductor switch

| Parameter | Operate val | Design val |
|---------------------------------|-------------|------------|
| Charging Voltage (kV), V_m | 18 | 25 |
| Charging Current (A), I_{rms} | 5 | 8 |
| Charging Current (A), I_{max} | 10 | 19 |
| Charging Time (ms) | 6 | 5.8 |
| Charging Inductance (H) | 2 | 2 |
| Charging Capacitance (μ F) | 1.4 | 1.4 |

체 스위치 소자를 설정하였으며 반도체 소자가 고전압 및 과전류에 약하므로 실제 사용 전압 및 전류의 약 2배 이상으로 값을 설계하였다. 반도체 소자의 용량은 현재 시판중인 싸이리스터가 약 6 kV, 5 kA로 값이 매우 싸며 한 개의 소자로 50 kV를 스위칭 하기는 어렵다

표 2 반도체 소자의 사양

Table 2 Specification of semiconductor device

| Parameter | Value |
|--|-------|
| Voltage (kV), V_{rms} Max | 1.6 |
| Current (A), I_{rms} | 50 |
| Surge On-state Current (A), I_{tsm} , $t=8.3$ ms | 480 |
| Rate-of-rise of On-state Current (A/ μ s), di/dt | 150 |
| Rate-of-rise of Commutating Voltage(V/ μ s), dV/dt | 1000 |
| Peak Reverse Gate Voltage (V), V_{rgm} | 10 |
| Gate Trigger Voltage (V), V_{gt} | 25 |
| Gate Trigger Current (mA), I_{gt} | 50 |
| Turn-off Time (μ s), T_q | 60 |

따라서 전류 용량에 맞는 소자를 여러 개 직렬로 연결하

여 50 kV를 스위칭 할 수 있는 모듈로 구성하려고 한다. 현재 운전중인 시스템의 전류 19 Amax와 전압 5 kVmax를 충족시키기 위해서 표 2와 같은 반도체 사양으로 싸이리스터 6 개를 한 모듈로 10 모듈을 직렬로 연결하여 반도체 스위치를 제작하려고 한다. 이를 위하여 싸이리스터 6 개의 한 모듈을 시제품으로 제작하여 시험을 하였다. 한 모듈은 전압 9.6 kVrms, 전류 50 Arms로 스위칭 시간은 약 7 ms이고 트리거 펄스는 10 V, 100 mA, 100-300 μs를 인가하려고 한다.

2.1.2 고전압 스위치 회로

지령충전 시스템에 적용하기 위하여 반도체 스위치를 직렬 연결하여 고전압 스위치를 그림 1과 같이 설계하였다. 고전압 스위치의 트리거 신호는 IGBT 소자를 사용하여 인가하고 고전원부와 신호전원사이는 펄스트랜스포머로 절연하였다.

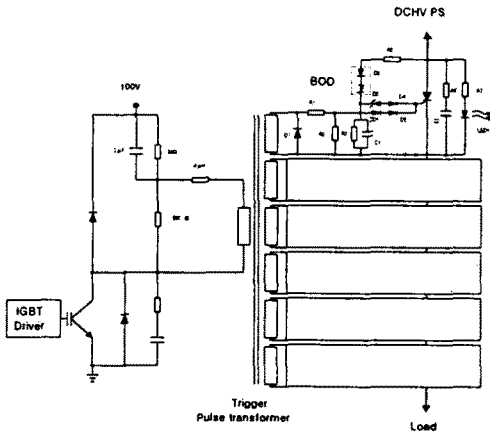


그림 1 고전압 반도체 스위치 회로
Fig. 1 Switching circuit of high voltage

2.2. 보호회로

고전압 반도체 소자를 직렬로 연결하여 사용할 경우에 발생하는 전압의 불균등 분배 및, 트리거 신호가 인가되지 않을 경우에 발생하는 과전압에 대하여 보호회로를 사용하여 강제로 트리거 신호를 인가하는 방식을 사용하였다. 그림 2와 같이 Breakover Diode(BOD)를 사용하여 싸이리스터 소자에 인가되는 고전압으로부터 소자를 보호하는 회로를 설계하였다. BOD는 애노드와 게이트사이에 전류제한용 저항과 직렬 다이오드로 연결하여 BOD의 역전압을 초과하는 전압으로부터 보호하고 있다. low-pass 필터 R1, C1과 다이오드 D1은 dV/dt에서 BOD의 전위전류를 막아주는 역할을 하고 있으며 D1, D2, D3은 고속회복특성을 갖는 다이오드를 사용하고 있다. 저항 R5와 R2는 BOD의 전류 I_{TM} 의 최대값으로 결정이 된다. 아주 느린 상승 전압을 얻기 위하여 캐패시터 Cs는 충분히 충전될 수 있어야한다. 빠른 상승전압을 얻기 위하여 RsCs는 커야하며 주 스위칭소자의 적은 접합 캐패시턴스가 충전하기 위하여 R2는 BOD의 Breakover 전압에서 전류를 제한하는데 효과적이다. 그러므로 2가지의 조건을 고려해야한다.

1) 적은 dV/dt에서 BOD의 전류는

$$I_{TM} \approx V_{BO} / (R_s + R_2)$$

이고

2) 높은 dV/dt 에서 BOD의 전류는

$$I_{TM} \approx V_{BO} / R_2$$

이다.

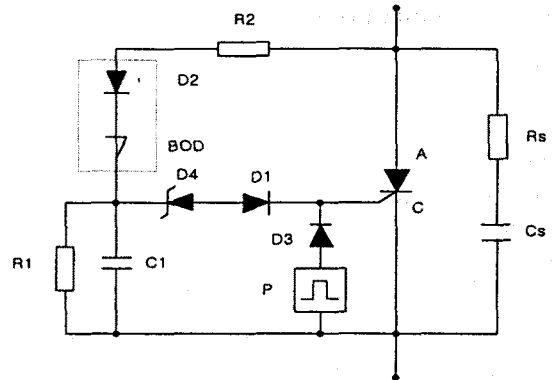


그림 2 BOD를 사용한 과전압 보호회로
Fig. 2 Overvoltage protection with BOD. (Rs, snubber components)

2.3 트리거회로

반도체 소자를 직렬로 연결하여 고전압을 스위칭하는 방식에는 문제점이 많이 있다. 첫째로 트리거회로와 주 스위치 부의 전압차이가 매우 크기 때문에 절연을 하여 주어야 하며 둘째로 빠른 상승속도를 갖고 Jitter가 적은 동일한 시간에 각 반도체 소자에 트리거 신호를 인가하여야 한다. 이 시스템의 트리거 방식은 다중권선식 펄스트랜스포머를 사용하여 주회로와 트리거 회로사이를 절연하는 동시에 동일한 시간에 각 반도체 소자에 트리거 신호를 인가하는 방식을 채택하고있다. 이 방식은 그림 1에 보인다.

2.4 시뮬레이션 및 시험 결과

고전압 반도체 소자는 1.6 kVrms, 50 Arms의 소자를 6개 직렬로 연결한 한 개의 모듈에 전압을 인가하여 시험을 하였다. 인가 고전압은 5 kV, 전류는 300

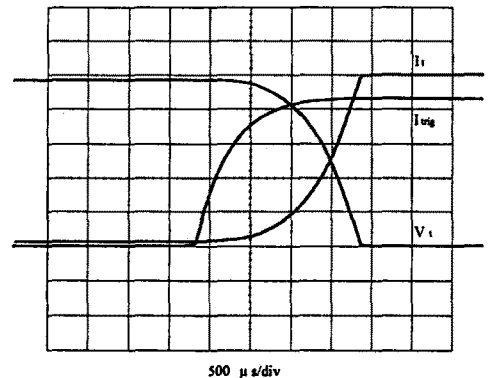


그림 3 고전압 반도체 스위치 모듈의 시뮬레이션 파형

Fig. 3 Simulation Waveform of HV Switch Module, $V_i = 1 \text{ kV/div}$, $I_i = 50 \text{ mA/div}$, $I_{trig} = 50 \text{ mA/div}$

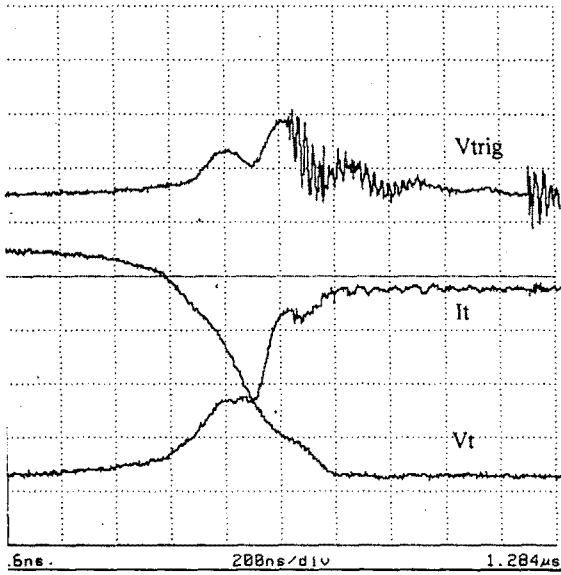


그림 4 고전압 반도체 스위치 모듈의 시험 파형

Fig. 4 Test waveform of HV switch module

($V_t = 1 \text{ kV/div}$, $I_t = 50 \text{ mA/div}$, $V_{trig} = 2 \text{ V/div}$)

mA이었다. 그림 3은 고전압 반도체 스위치 모듈의 시물레이션 파형이다. V_t 는 고전압 스위치에 인가되는 전압 파형, I_t 는 스위치에 흐르는 전류, I_{trig} 는 각 소자에 인가되는 트리거 신호 전류이다.

그림 4는 고전압 반도체 스위치 모듈의 시험 파형이다. V_t 는 스위칭시 고전압 스위치에 인가되는 전압 파형이고, I_t 는 스위치에 흐르는 전류, V_{trig} 는 스위치에 인가되는 트리거 신호이다. 상승속도가 약 600 ns로 스위칭 동작특성이 양호하다.

그림 5는 고전압 반도체가 스위칭 할 때 특정 소자에 트리거 신호가 인가되지 않았을 때 BOD 회로에

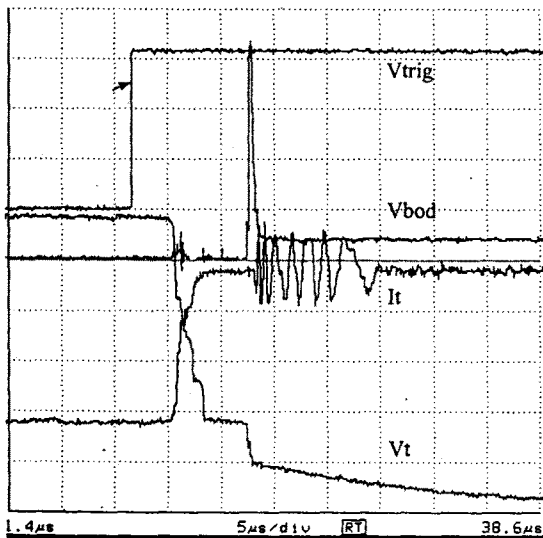


그림 5 고전압 반도체에서 BOD의 동작 시험 파형

Fig. 5 Test waveform of HV switch module at operated BOD

($V_t = 1 \text{ kV/div}$, $I_t = 50 \text{ mA/div}$, $V_{trig} = 2 \text{ V/div}$)

의해서 강제적으로 트리거 신호를 발생하여 소자에 인가하여 동작하는 파형이다. BOD에 의해서 트리거 신호가 인가되는 지점은 약 5 ms 정도 지연이 되었으나 스위치 동작특성은 양호하다.

그림 6은 고전압 반도체가 스위칭 할 때 인가되는 전압 파형으로 접지 점으로부터 각 파형을 측정하였다.

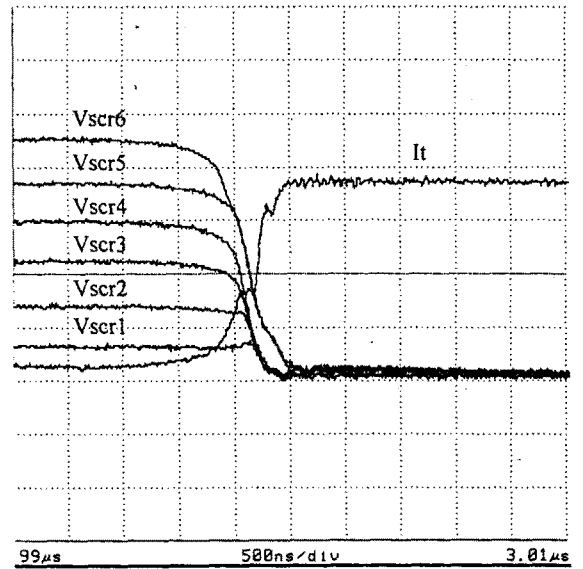


그림 6 개별 SCR 소자의 전압파형

Fig. 6 Voltage waveform of each SCR device

($V_t = 1 \text{ kV/div}$, $I_t = 50 \text{ mA/div}$)

3. 결 론

고전압 반도체 스위치를 구현하기 위하여 시제품으로 6개의 싸이리스터를 사용하여 한 모듈을 제작 및 시험을 하였다. 고전압 스위치 모듈은 정상적으로 동작을 하였으며 상승속도도 약 600 ns로 양호하였다. 개별 소자에 이상이 발생하여 트리거 신호가 인가되지 않을 경우에 전압이 BOD소자의 Breakover 전압으로 소자를 계속 점화시키는 트리거 신호를 발생하여 과전압 보호회로도 동작을 잘하였다. 앞으로 운전 중인 시스템의 목표값인 전압 50 kV, 전류 30 Arms를 스위칭하기 위하여 10개의 모듈을 직렬로 연결하여 구현을 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.