

고전압 대전류 반도체스위치 특성에 관한 연구

손윤규\*, 오종석, 장성덕, 조우현, 남궁 원  
포항공과대학교 가속기연구소

Study on the semiconductor switch with high voltage and high current

Y. G. Son\*, S. D. Jang, J. S. Oh, M.H. Cho and W. Namkang  
Pohang Accelerator Laboratory, POSTECH

**Abstract** - 고전압 대 전류를 필요로 하는 펄스 파워 시스템에서 스위치는 중요한 소자중의 하나이다. 펄스 트랜스포머를 이용하여 고전압 펄스를 만드는 회로에서 대전류 스위칭에는 대부분 스파크 갭 스위치나 싸이러트론을 사용하는데 높은 펄스 반복율과 긴 수명을 제공하기 위해서는 반도체 스위치를 사용해야한다. 고전압 대전류 펄스파워 시스템에 적합한 반도체 스위치의 스위칭 특성과 제어방식에 관한 연구를 수행하였다.

실험에 사용한 스위치는 20 kV, 12.6 kA, 12  $\mu$ s의 펄스 스위칭이 가능한 ABB사의 반도체스위치 스택(5SPR-26L4508-8-WC)이다. 실험회로는 콘덴서에 충전을 완료한 다음 스위치와 인덕터를 통하여 방전하도록 구성하였다. 8개의 직렬 연결된 스위치는 광케이블을 사용하여 병렬구동하고, 고주파 스위칭 전류전원을 사용하여 고전압 절연을 하면서 게이트 구동전력을 전달하도록 하였다. 본 논문에서는 스위치 전압과 방전전류를 관측하여 반도체 스위치의 특성을 조사하였다.

1. 서 론

고전압, 대전류의 펄스시스템은 펄스 트랜스포머의 1차단에서 방전을 일으켜 높은 펄스를 만드는 회로와 고전압 측에서 직접 방전을 시켜 펄스를 얻는 방법이 있다. 이들 회로에서 펄스 폭을 결정하는 주요인자는 회로의 인덕턴스와 커패시터에 의해 결정되어진다. 빠른 상승시간과 펄스 폭을 요구하는 시스템에서 스위치는 턴-온 시에 전압강하가 적어야 하고 순간적으로 발생하는 대전류에도 견디어야 한다. 본 실험에서는 반도체 스위치가 갖는 턴-온 시의 저항과 대전류의 전달특성에 관한 연구를 수행하였다.

2. 본 론

2.1 반도체 스위치 구성

고전압 대전류 스위칭으로 사용한 반도체스witch는 ABB사의 반도체스위치 스택(5SPR-26L4508-8-WC)을 이용하여 회로를 구성하였다. 지름  $\varnothing$ 91 mm 실리콘 반도체 8개를 직렬로 연결한 스위치는 히터싱크와 조합하여 이들 소자들을 일정압력으로 고정하는 부도체 구조물에 의해 고정되도록 되어있다. 그림 1은 반도체스위치 외관도이다. 각각의 소자는 게이트 구동회로를 갖고 있으며 게이트 구동용 전원은 외부로부터 공급되도록 되어있다.<sup>(1)(2)(3)</sup> 게이트 구동용 전원은 외부에 정전류 전원장치인 SMPS(switching mode power supply) 1차 권선인 PCB의 ferrite 변압기를 관통하도록 되어있다. 구동용 전원으로 사용된 정전류 전원장치는 스위칭 주파수가 25 kHz이며 1 차축에 흐르는 전류는 4 A<sub>r-p</sub>이다.

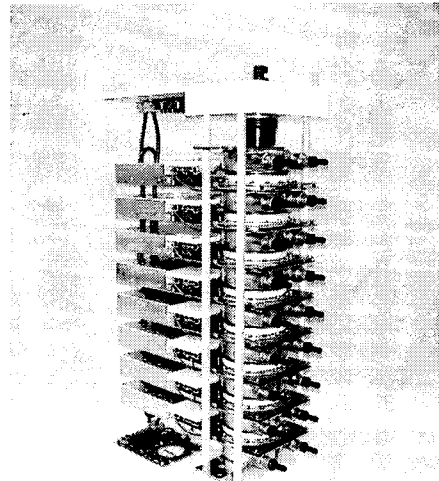


그림 1 반도체스위치 외관도  
(5SPR-26L4508-8-WC)

표 1 Parameters of 5SPR-26L4508-8-WC

Design Parameter	Value
Max. charge voltage [kV]	20
Blocking voltage [kV]	30
Peak current [kA]	12.6
Di/dt [kA/ $\mu$ s]	$\leq 10$
Rep. Rate [Hz]	300
Silicon size [mm]	$\varnothing$ 91
Devices in series [pcs]	8
Switch On Time [ $\mu$ s]	300
Pulse width [ $\mu$ s]	12
Triggering	Optical input signal
Jitter for trigger [ns]	$< 50$
Cooling	Deionized water
Clamping force [kN]	40(+10% ~ -15%)
Clamping method	Belleville spring pressure pack

반도체스위치 상세 사양은 표 1과 같다.

2.2 스위치 실험회로

반도체 스위치 실험회로는 그림 2와 같이 구성하였다. 스위치 실험을 위한 전원으로서는 커패시터 충전인버터

(Maxwell, 30 kV, 0.5A, 8 kJ/sec)를 사용하였다. 전원장치의 부하로는 4  $\mu$ F의 커패시터를 사용하였고, 직렬로 삽입된 저항 R1과 R2, 다이오드는 전원장치를 보호하기 위한 보호회로이다. 스위치 스택은 커패시터와 병렬로 연결하고 스위치를 닫아 커패시터에 충전된 에너지가 방전이 되도록 하였다. 스위치와 직렬로 삽입된 인덕터는 에너지저장용 커패시터와 스위치를 연결하는 동축케이블의 등가 인덕턴스이며 LCR meter 측정 시 2.5  $\mu$ H이고 길이는 1.2 m로 측정되었다. 스위치의 온 시간은 300  $\mu$ s이며 방전회로가 R-L-C 직렬공진회로로 되어 공진이 이루어진다.

### 2.3 회로분석

그림 3은 고전 반도체스위치 시험회로의 등가회로도이다. 회로에서 전압방정식은

$$E = V_R + V_L + V_C$$

$$= iR + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int idt [V]$$

로 나타낼 수 있다. (4)

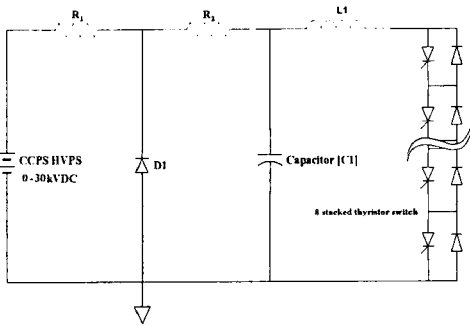


그림 2 스위치 시험회로도

회로에 흐르는 전류는 계산해 보면

$$i = \frac{2Ei}{\sqrt{\frac{4L}{C} - R^2}} e^{-\frac{Rt}{2L}} \sin \sqrt{\frac{4L}{C} - R^2} t [A]$$

로 된다.

이때 회로에 흐르는 최대전류는

$$I_0 = \frac{2Ei}{\sqrt{\frac{4L}{C} - R^2}} [A]$$

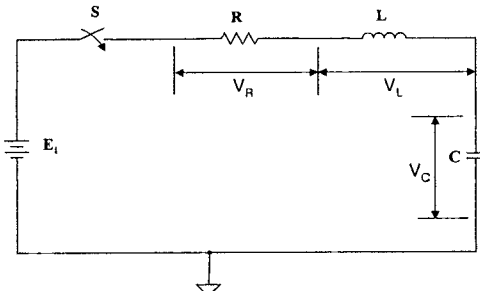


그림 3 스위치 시험회로의 등가회로도

로 된다.

그림 4는 스위치 등가회로에서 부속진동에 의한 전류 파형을 보여주고 있다.

스위치 실험은 커패시터에 인가되는 전압과 회로변수를 달리하여 측정을 하고, 이때 회로에 흐르는 전류와 펄스 폭을 관측하였다.

### 2.4 고전압 인가시험

전압인가시험은 3단계로 나누어 실시하였다. 1단계로는 2 kV의 전압을 인가하여 반도체 스위치 각단에 전압이 고르게 분배되는 것을 확인하고 주변회로의 동작 상태 유무를 점검하였다. 스위치와 병렬로 연결된 sharing resistor (각단 3 $\times$ 47 k $\Omega$ /50 W)의 전압분배와 외부에서 공급하는 게이트 구동용 전원의 동작상태를 확인하였다. 2단계로는 8 kV의 전압을 인가하여 스위

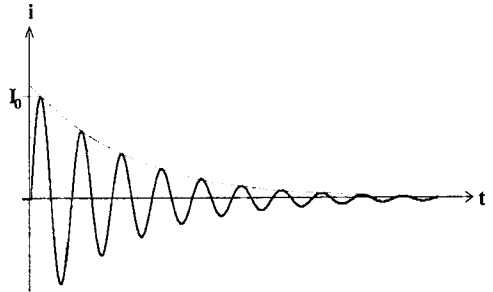


그림 4 부속제동시의 전류파형

치 게이트 신호를 인가하여 스위치의 동작상태를 확인하였다. 단계적으로 스위치 정격전압까지 전압을 상승하면서 스위칭동작시험을 실시하였다. 고전압 인가시험은 회로의 변수를 변경하였을 때 스위치양단전압과 전류 파형을 관측하고 측정된 결과로부터 계산에 의한 데이터를 분석하였다. 턴-온 시의 전류와 에너지가 소비되는 시간을 측정하여 스위치 온 저항을 계산하고 소비되는 전력을 계산하였다. 그림 5는 반도체스위치 전산모사의 등가회로이며 측정된 결과로부터 산출된 파라메타를 컴퓨터 전산모사를 하고 실제 측정된 전압, 전류파형을 그림 6에 표시하였다. 반도체 스위치를 적용하는 펄스파워 시스템의 장치효율은 90% 이상을 유지하고 나머지 10%는 실제 전력으로 변환되지 않는 손실에 해당된다. (5) 전체 전력손실 10% 중에 스위치가 차지하는 전력손실은 5%에 해당되는 6 kW로 계산되었다. 전력손실에 따른 효율적인 냉각이 필요하며 스위치 냉각방

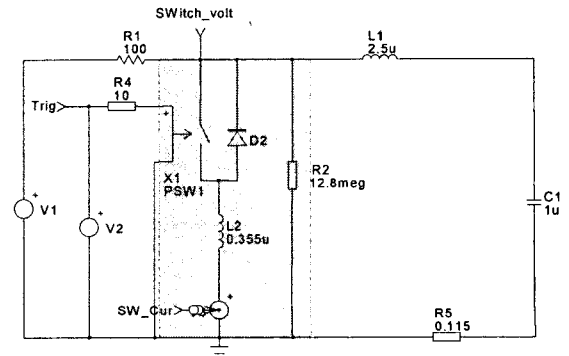


그림 5 스위치 전산모사 등가회로

식은 냉각수를 이용한 강제순환방식으로 하였다. ABB사의 5SAB 20V0800 116mm $\phi$ 의 접촉면적을 갖는 water-cooled heart-sick을 사용하여 냉각을 하였다

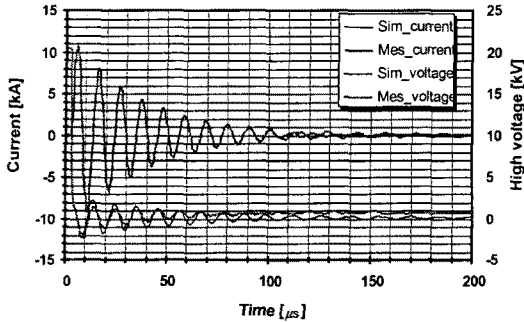


그림 6 스위치 전사모사 전압, 전류 및 실측전압, 전류파형 비교

다. 반도체스위치의 경우 각각의 소자에 대해 고전압이 인가되어 있으므로 절연을 고려하여 de-ionized water를 사용하였고 압력 1.5 bar 3 l/min의 유량으로 설계하였다. 열 부하 6 kW에 대해 스위치 모듈에서 상승한 냉각수의 출구온도는 29  $^{\circ}$ C, 입구온도 25  $^{\circ}$ C 외기 공기온도는 25  $^{\circ}$ C 냉각수순환유량은 3 l/min으로 입, 출구 냉각수 온도차이는 4  $^{\circ}$ C로 최대냉각능력은 5.5 K/kW의 계산결과를 얻었다. 그림 7은 고전압 방전실험 시 스위치 양단 전압 파형과 그때 흐르는 전류 파형이다. 표 2는 회로의 변수를 달리하면서 측정된 전압 전류 및 펄스 폭을 기록하고 계산

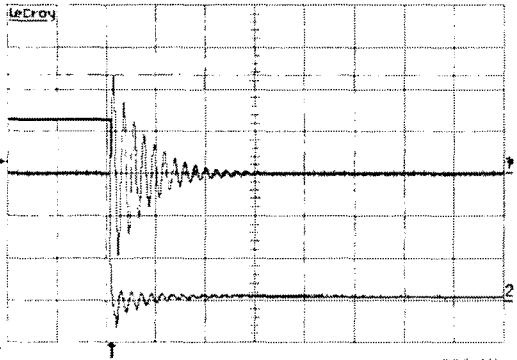


그림 7. 고전압 방전 시에 스위치양단전압과 전류 파형 (CH 1: current waveform 500 A/div CH 2: voltage waveform 2 kV/div)

과 측정을 하면서 측정된 스위치 파라메타를 보여주고 있다.

### 3. 결 론

반도체 스위치를 이용한 고전압 방전시험에서 정격전압 20 kV 에서 11.6 kA, 펄스 폭 11.38  $\mu$ s를 얻었다. 에너지 저장용 커패시터와 병렬로 연결된 스위치를 온시켜 단락부하 상태의 RLC 직렬회로에서 회로전체저항과 스위치 저항 값을 계산하였다. 정격전압에서 운전시 스위치에서 소비되는 전력량을 계산하고 냉각에 필요한

냉각수 유량을 설계하였다. 부하시험은 출력전압 150 kV에서 전류 9 kA, 펄스 폭 7  $\mu$ s, 270 Hz로 운전하였다. 고전압 대전류를 필요로 하는 펄스파워 시스템에서 스위치 온 시의 내부저항이 적어야 한다. 내부저항이 크면 전력손실이 커지기 때문에 냉각장치 또한 커져야 한다. 수  $\mu$ s펄스를 높은 반복율로 운전되는 방전회로의 전반적인 분석과 현장 실험을 토대로 전체적인 전력

표 2 스위치 방전시험 파라메타

Parameter	Unit	PLS			
input voltage	kV	21	12		
current(calculated)	kA	13.82	16.36		
capacitor(calculated)	$\mu$ F	1	4		
inductor(measured)	$\mu$ H	2.5	2.5		
resonant impedance	$\Omega$	1.52	0.758		
pulse width(calculated)	$\mu$ s	9.63	19.06		
<b>Measurement value</b>					
measured voltage	kV	21	12		
current(measured)	kA	11.6	12.4		
capacitor(measured)	$\mu$ F	1	4		
inductor(calculated)	$\mu$ H	3.28	3.75		
resonant impedance	$\Omega$	1.81	0.967		
pulse width(measured)	$\mu$ s	11.38	24.33		
<b>Measurement of ESR for capacitor &amp; inductor</b>					
Unit [m $\Omega$ ]	L-ESR	C <sub>1</sub> -ESR	C <sub>2</sub> -ESR	SW-ESR	Total-ESR
C <sub>1</sub> [1 $\mu$ F]		78			
C <sub>2</sub> [4 $\mu$ F]			35		
L + C <sub>1</sub>	35	115		85	200
L + C <sub>2</sub>	25		59	37	96

손실을 줄일 수 있는 연구를 수행할 것이다.

### [참 고 문 헌]

- [1] A. Welleman, U. Schlapbach, E. Ramezani, "Plug and play solid state switching system for laser applications" IEEE, 1999
- [2] E. Ramezani, E. Spahn, G. Bruderer, "High Voltage Thyristor Switch for Pulse Power Applications", IEEE, 1995
- [3] E. Ramezani, E. Spahn, G. Bruderer, "A Novel High Current Rate SCR for Pulse Power Applications", IEEE, 1997
- [4] Santokh S. Basi "Semiconductor Pulse and Switching Circuits", pp109-134, 1980
- [5] 조무현 외 13명, "Development of high average power modulator for Industrial Application of pulsed Corona Process to Flue Gas(II)", RIST 과제보고서, 2001