

고전압 대전류용 TVS(Triggered Vacuum Switch) 개발

박성수, 남상훈, 김상희, 한영진, 권영건, 허훈, 김승환, 박용정, 홍만수
포항공과대학교 가속기 연구소

Development of High Voltage High Current TVS(Triggered Vacuum Switch)

S.S. Park, S.H. Nam, S.H. Kim, Y.J. Han, Y.G. Kwon, H. Heo, S.H. Kim, Y. J. Park, M.S. Hong
Pohang Accelerator Laboratory, POSTECH

Abstract - 고전압 대전류 시스템에 사용하는 스위치의 기본 요구조건은 저가, 긴 수명, 적은 지터와 대용량 그리고 seal-off 형태로 쉽게 설치하여 운전하는 것이다. 본 논문은 고전압 대전류용 Seal-off TVS (Triggered Vacuum Switch)를 개발하는 것을 목적으로 하고있다. 제작한 TVS는 양전극과 음전극이 교대로 고정된 간격으로 각각 3개의 전극으로 배열되어 있으며 전극은 사다리꼴 모양으로 되어있고 트리거 시스템과 개스를 흡수하는 게터가 내부에 설치되어 있다. 제작한 스위치 내부는 약 10^{-7} torr의 진공상태를 유지하고 있으며 세라믹 챔버를 사용하여 Seal-off 상태로 설계, 제작하였다. TVS의 에너지 최고 전달량은 74 C 이며 30 kV, 100 kA, 1~2 ms의 스위치를 제작하여 시험을 하였다. 스위치 시험 장치는 200 μ F, 22 kV 6개를 병렬로 연결한 커패시터 बैं크와 160 μ H의 인덕터와 0.2 Ω 의 저항을 이용하여 시험 장치를 구성하였다. 본 논문은 제작한 스위치의 전기적인 특성 시험한 결과에 대하여 논하고자 한다.

1. 서 론

포항가속기 연구소(PAL, Pohang Accelerator Laboratory)에서 고전압 대전류 스위치 용 TVS를 개발 중에 수행한 연구는 TVS 시제품 제작 공정 개발 및 전극 물질의 개발, TVS 시제품 시험이었다. 이와 병행하여 트리거 시스템 개발과 트리거 발생기의 개발 및 시험을 하였다. 시제품 제작을 위한 제작 공정 (a) 설계, (b) 부품 가공, (c) 화학연마 및 화학 세척을 통하여 부품을 세척, (d) 금속처리(Metalizing)된 세라믹과 금속의 접합, (e) 스팟 용접(Spot welding), (f) 전체적인 조립 및 금속 용접, (g) 스위치 챔버의 진공 누설시험, (h) 트리거 길들이기(Conditioning), (i) 게터(Getter)의 활성화 및 개스 제거, (j) 밀봉(Seal-off)으로 시제품 제작 완료 단계를 거친다.

이러한 과정을 통하여 제작한 시제품을 커패시터 बैं크 100 kJ과 300 kJ에 설치할 하여 전기적인 시험을 하였으며 요구되는 전압 (V_s) 0 - 22 kV, 전류 (I_s) ~ 100 kA, 동작주파수 (f_s) Single shot / 1 pps (burst mode), 동작시간 (t_{on}) 1 - 2 ms, 전하량 (Q_s) 50 - 100 coulomb, 트리거 제어 가능 및 기타 (스위치의 정류 특성 검사)를 만족하는 결과를 얻었다.

2. 본 론

2.1 스위치 제작

2.1.1 시제품 TVS 제작

시제품 TVS 제작공정은 그림 1과 같다.

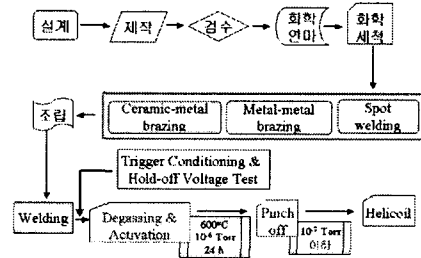


그림 1. 시제품 TVS 제작 공정

시제품 TVS 제작은 스위치를 설계하고 스위치 각 부품을 가공하였으며 가공시 묻은 이물질 제거 및 거친 부분을 매끄럽게 처리하는 화학 연마 및 화학 세정의 과정을 통하여 이중 접합하기 전까지의 제작 준비 과정을 마친다. 그리고 각 부품별로 이중접합을 하고 접합이 끝나면 조립 과정으로 접합된 부품을 조립하면 1차 제작공정은 완료된다. 그리고 개스 진공 누설 시험으로 누설 여부를 판단하고 트리거 길들이기(Conditioning)를 통하여 트리거 조건을 갖춘 후 탈가스 노(Degassing Furnace)에서 스위치 내부에 있는 게터(Getter)의 활성화(Activation)와 개스 제거 과정을 거쳐서 스위치 내부가 진공으로 유지한 상태에서 밀봉(Seal-off)을 진행한다. 그림 2는 스위치 설계도면이고 그림 3은 제작한 스위치 사진이다. 제작공정에 필요한 공정은 다음과 같다.

가. TVS 설계 및 부품 가공

나. TVS 부품의 화학 연마(Polishing) 및 세척

다. TVS 접합 및 용접

- 진공 노(Vacuum Furnace)에서 접합(Brazing) 시험 및 누설(Leak) 시험

- 진공 노(Vacuum Furnace)에서 이중 금속 접합(Brazing)

- 금속 용접

라. TVS 누설 시험 및 Hold-off 전압 검사와 트리거 길들이기

- TVS 누설 시험

- Hold-off 전압 검사

- 트리거 길들이기(Conditioning)

마. 밀봉(Seal-off)을 위한 게터(Getter)

- 비증발형 게터(Non-evaporable Getter, NEG)

- 증발형 게터(Evaporable Getter, EG)

바. 시제품 TVS 밀봉(Seal-off)

고 400 A가 흐르는 것으로 측정이 되었다.

2.2 스위치 시험 및 결과

2.2.1 스위치의 100 kJ 시험

50 kV, 160 mA 고전압 전원공급장치로부터 100 kΩ의 저항을 통하여 100 μF의 저장용 커패시터에 에너지를 저장 한 후 설치된 TVS 에 트리거를 인가하여 시제품의 전기적인 시험을 하였다. 제작된 TVS 시제품은 1차로 40 kV 까지 Hold-off 시험을 하였으며 이상이 없었다. 그림 4는 스위치 시험 장치에 시제품 TVS를 설치하여 시험하여 얻은 전압, 전류 시험 파형이다. 고전압 전원공급장치를 사용하여 커패시터 뱅크에 전압을 30 kV까지 전압을 인가하여 시제품 TVS의 전압 인가시험을 하였으며 이때의 전류는 약 90 kA이었으며 펄스폭은 약 100 μs이었다. 그리고 전하 전달량은 약 74 C를 얻었다.

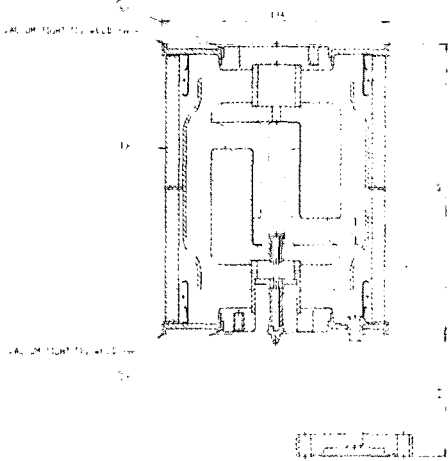


그림 2. TVS 설계 도면

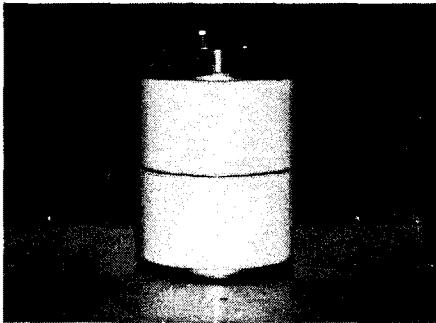


그림 3. 동전극으로 제작한 TVS 시제품

2.1.2 트리거 펄스 발생기 제작 및 시험

트리거 장치는 대 전력용 스위치에 있어서 인위적 스위칭 작용을 위하여 매우 중요한 역할을 한다. 트리거 장치의 개발이 하나의 연구 분야가 될 만큼 중요하여 많은 형태와 다양한 방법의 트리거 장치가 있다. 트리거 매카니즘에서 언급했듯이 트리거 핀과 음극 사이의 절연체 표면을 따라 표면 방전(Surface Discharge or Flash-over)에 의한 아크가 발생하여 주 전극의 방전을 일으키는 방식의 트리거 장치를 만들어서 TVS에 장착했다. 음극의 중앙에 트리거 전극이 있으며 음극과 트리거 전극은 세라믹으로 절연이 되어있다.

트리거 시스템은 크게 다음과 같이 세 부분으로 구분된다. 직류 전원 부분 (DC 1 kV), 제어 부분 (SCR Circuit), 고압 부분 및 필터 부분으로 구성이 되며 트리거의 동작은 다음과 같다. 입력 전압을 정류 후 충전용 커패시터에 충전된 에너지는 SCR에 게이트 트리거 신호가 인가되면 커패시터에 저장된 에너지는 SCR 소자와 1:5의 펄스 트랜스 포머(Pulse Transformer)를 통하여 부하인 TVS의 트리거 전극에 5 kV의 전압이 출력된다. 무부하시 출력 전압은 5 kV를 나타내며 트리거에 연결하여 시험한 결과 전류는 최

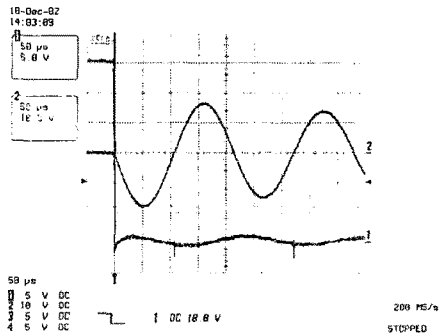


그림 4. 100 kJ에서 시험 파형(30 kV, 90 kA)

2.2.2 300 kJ 커패시터 뱅크

시제품을 사용하여 간펄스 시험을 하기 위하여 300 kJ의 회로를 그림 5와 같이 구성하였다.

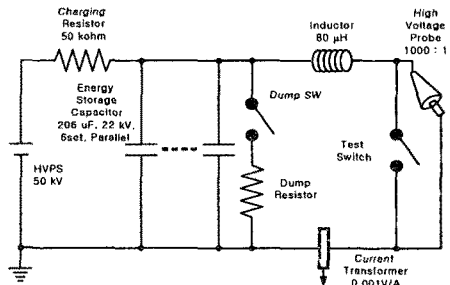


그림 5. 300 kJ 시험 회로

그림 6은 시제품 TVS를 시험하기 위하여 제작된 300 kJ의 시험 장치 사진이다. 왼쪽에 40 kV, 160 mA 고전압 전원공급장치, 5 kV, 400 A, 10 μs 트리거 펄스 발생기, 측정용 오실로스코프가 있고 오른쪽 중앙에 TVS 스위치 그리고 위쪽에 가변 뱀을 가진 인덕터(20 μH ~ 160 μH)가 있고 아래쪽에 22 kV, 206 μF 커패시터 6개가 병렬로 연결되어 설치되어 있으며 주전류를 측정하기 위하여 Pearson사의 전류 트랜스포머(Current Transformer) 0.001 V/A를 설치하였다.

3. 결 론

제작 공정을 거쳐 시제품을 제작하였다. 이러한 제작공정을 거쳐 제작된 시제품을 100 kJ과 300 kJ의 커패시터뱅크에 설치하여 각각 전기적인 특성시험을 하였다.

100 kJ의 커패시터뱅크에서는 30 kV를 인가하여 부하와 인덕턴스를 변화시키면서 시험을 하였으며 10 μ H의 인덕턴스에서 약 90 kA의 첨두전류와 100 μ s의 펄스 폭을 얻었으며 이때의 전하 전달량은 74 C이었다. 그리고 300 kJ의 커패시터뱅크에서는 20 kV를 인가하여 80 μ H, 0.25 Ω 에서 첨두전류 42 kA, 1.2 ms의 펄스 폭을 얻었으며 이때의 에너지는 250 kJ이었으며 전하 전달량은 약 25 C 이었다.

본 제품을 전극을 동으로 제작되었으며 앞으로 Moly와 CuCr 전극을 사용하여 제품을 제작하여 시험할 예정이다.

(참 고 문 헌)

- [1] Fowler, R. H. and Nordheim, L., Pro. Roy. Soc. A119, 193-81,(1928)
- [2] Miller, H. C. , "J. Franklin Inst.", 282, 382-8, (1966)
- [3] J.M. Lafferty, "Triggered Vacuum Gaps," Proc. IEEE, Vol. 54 No. 1, pp. 23-32, (1966)
- [4] I. Roth, J. T. Naff, J. Banister, P. Sincerny, "Development of a Repetitive High Coulomb Transfer Switch," 7th Int. Pulsed Power Conf., 1989, pp 552-554.
- [5] C. W. Kimblin, "Anode Phenomena in Vacuum and Atmospheric Pressure Arc", IEEE Trans, Plasma Science., PS-2. p. 310, 1974.
- [6] Y. G. Chen, r. Dethlefsen, R. Crumley, "High Coulomb Triggered Vacuum Switch", 9th IEEE Int. Power Conf. 1993, pp 938-941.
- [7] R. Dethlefsen, V. A. Sidorov, V. A. Vozdvijenskii, "Triggered Vacuum Switch Testing for Millisec Pulses," 8th IEEE Int. Pulsed Power Conf., 1991, pp 511-514.
- [8] Raymond L. Boxman, Philip J. Martin, and David M. Sanders, " Handbook of Vacuum Arc Science and Technology" 1995.
- [9] T. Warren, J.Dickens, A.Neuber, and M Kristiansen IEEE Porc 1999.

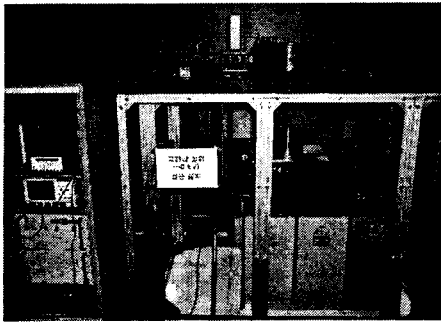


그림 6. 300 kJ 시험 장치

그림 7은 300 kJ 스위치 시험 장치에 시제품 TVS를 설치하여 시험하여 얻은 전압, 전류 시험 파형이다. 회로의 인덕턴스 80 μ H와 회로 저항 0.25 Ω 을 사용하여 고전압 20 kV를 인가하여 최대 전류 약 42 kA와 펄스폭 약 1.2 ms를 얻었으며 충전 에너지는 약 250 kJ이었다.

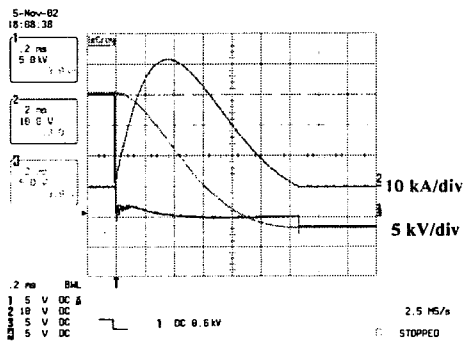


그림 7. 80 μ H, 0.25 Ω 에서 시험한 파형

표 1은 제작한 스위치를 100 kJ과 300 kJ에서 시험한 내용을 정리하였다. 시험한 내용은 각각의 인덕턴스를 바꾸면서 시험을 하였을 때의 전압과 전류값 그리고 펄스폭등을 정리하였으며 특히 진공스위치에서 발생하는 정류현상에 가장 많은 영향이 있는 di/dt의 값을 구하였으며 스위치가 스위칭시 에너지를 전달하는 전하량을 구하여 정리하였다.

표 1. 제작한 TVS의 시험 결과 요약

항목	단위	시정	시험 결과									
			100 kJ					300 kJ				
			5 μ H	10 μ H	0.15 Ω	Wire	10 μ H	80 μ H 0.125 Ω	80 μ H 0.25 Ω	80 μ H 0.25 Ω		
전압	kV	0 ~ 22	5 ~ 20	5 ~ 20	5 ~ 20	10	30	8	20	10		
전류	kA	~ 100	74	63	52	105	90	24	42.2	21		
충격시간 Half period	μ s	1000 ~ 2000	83	100	83	20	83	1000	1200	1200		
전하량	C	50 ~ 100	3.07	3.15	2.15		74	12	25	14		
스위치 최대		가용	가용	가용	가용		719	719	가용	가용		
dV/dt	kV/ μ s		1490	1510	1260	17500	1800	95	105	2		
			220 kV	220 kV	220 kV	110 kV	0.30 kV	0.8 kV	20kV			
300er	μ s										2 18 kV, 5 stat	
Deltec	μ s		2.2	2	2.4						3.2 80 kV	