

SPD 직병렬 조합회로의 열적 안정성 평가

(Thermal Stability Evaluation of SPDs with Parallel or Series Circuit Assemblies)

엄주홍 · 조성철

(Ju-hong Eom · Sung-chul Cho)

기초전력연구원

Abstract

Surge protective devices can be divided into three categories based on the circuit assembly: a parallel circuit type that considers the surge current amount within the device, a series circuit type that considers the voltage and single circuit type that uses a single element. However, when assembling SPDs, there are many things including function and safety to be taken into consideration because they are directly related to the performance and safety of the device. In this paper, we executed an experimental comparative study of performance and thermal stability of each SPD type using lightning surge generator and thermal image camera.

1. 서 론

초고속 정보화시대에 부응하여 전기·전자·통신 기기의 고기능화, 소형화를 위한 고밀도 집적회로의 사용이 증가하게 되었고 이들 기기는 과거와는 달리 낙뢰나 개폐기 조작 시 발생하는 서지전압에 매우 취약한 특성을 가진다. 서지전압에 대한 대책으로 전기·전자 기기의 전원 및 신호·통신회로에 가스튜브, TVS(Transient Voltage Suppressor) 다이오드, 바리스터 등 각종 보호소자들이 사용되고 있으며, 이들 보호소자의 적용으로 기기의 신뢰성은 한층 증가되었다.[1] 이중 산화아연형 바리스터(ZnO Varistor)는 양방향성 보호소자로 다른 보호소자에 비해 에너지 내량이 크고 동작속도가 빠르면서도 광범위한 제한전압의 설정이 가능하며, 전압-전류의 비선형 저항특성이 우수하고 가격이 저렴하여 전원용 SPD (Surge Protective Devices)의 주요소자로 널리 사용되고 있다.[2] 이와 같이 산화아연형 바리스터는 서지전압에 대해 보호소자가 갖추어야 하는 전기적 특성을 가지고 있지만, 반복되는 보호동작으로 열화가 진행되면 누설전류가 흘러 이로 인한 기기의 오동작, 감전, 화재 등 2차적인 사고를 유발시킬 수 있으므로 이에 대한 분석과 대책이 필요하다.[3] 또한 최근에 최대 연속동작 전압(U_c)을 가변하기 위하여 바리스터를 직렬 연결하는 경우와 기기와 작은 전류내량을 가진 소자를 병렬 연결하여 최대방전전류를 크게 하는 경우가 있다.

본 연구에서는 서지보호기의 특성을 결정짓는

소자인 바리스터의 직렬 혹은 병렬로 조합하여 사용할 때 나타나는 제한전압특성, 열적안정성, 누설전류 특성시험을 수행하였으며 이러한 특성연구를 통하여 서지보호기의 안전성평가 및 조합형 서지보호장치의 개발에 활용할 수 있는 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 본 론

2.1. 실험장치 및 방법

ZnO 바리스터는 교류 과전압과 뇌서지 전압에 의해 열화가 시작된다. 이러한 바리스터의 열화과정은 뇌서지 전압에 의하여 1차적으로 열화가 시작되어 진행이 되면 교류 과전압뿐만 아니라 정격전압에서도 열화가 가속화되어 바리스터가 파괴되어 질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 뇌서지 전압과 교류 과전압을 순차적으로 인가하여 바리스터의 직렬 혹은 병렬 조합에 따른 제한전압 특성, 열적 특성, 누설전류 특성 등을 평가하였다.

실험에 사용된 바리스터는 직렬조합의 특성평가를 위하여 U_c 가 320 [V]인 바리스터 2개를 직렬로 연결하여 U_c 가 420 [V]인 바리스터와 비교실험을 하였다. 각각의 바리스터는 220 [V] 라인에 주로 사용되는 소자로서, 최대방전전류(I_{max})가 40 [kA]이다. 또한 U_c 가 275 [V]인 바리스터 2개는 직렬 연결하여 U_c 가 510[V]인 바리스터와 비교실험을 하였다. 병렬조합의 특성평가에는 U_c 가 320 [V], 최대방전전류 10 [kA]인 소자 4개를 병렬로 연결하여 사용하였으며, 단일소자로 최대방전전류가 40

[kA]인 소자와 비교하였다.

뇌서지 전류 인가장치는 국제규격의 조합형 서지발생장치(1.2/50 μ s, 20 [kV])를 사용하였으며, 바리스터가 동작하였을 때 흐르는 서지전류는 8/20 μ s, 10 [kA]가 되도록 출력저항을 2 [Ω]로 조정하였다. 누설전류 측정장치는 10 [μ A] 및 10 [mA]의 분해능을 가지는 CT 2개를 사용하여 측정하였다. 바리스터의 국부적인 발열이나 열적 폭주를 관측하기 위하여 열화상 카메라를 사용하였다. 열화상 카메라는 온도분해능이 0.03 [°C]이며, 열화상으로부터 특정지점 또는 특정면적의 온도변화를 관측하였다.

바리스터의 직렬 혹은 병렬조합의 특성평가를 위한 시험과정은 그림 1에 나타내었다. 그림 1에 나타낸 순서도는 IEC규정을 토대로 하여 바리스터의 제한전압, 열적안전성, 누설전류 특성시험을 효과적으로 수행할 수 있도록 재구성한 시험과정이다[4]. 시험의 순서는 정상적인 바리스터의 제한전압과 누설전류를 각각 측정한 후에 20회의 1.2/50 μ s 와 8/20 μ s의 뇌서지 조합파형을 인가하며, 다시 제한전압과 누설전류를 측정하도록 구성되어 있다. 바리스터에 스트레스를 주는 서지전압을 인가한 후에 바리스터의 특성변화를 보기 위한 시험이며, 이후 다시 교류과전압을 인가하는 시험을 반복하였다.

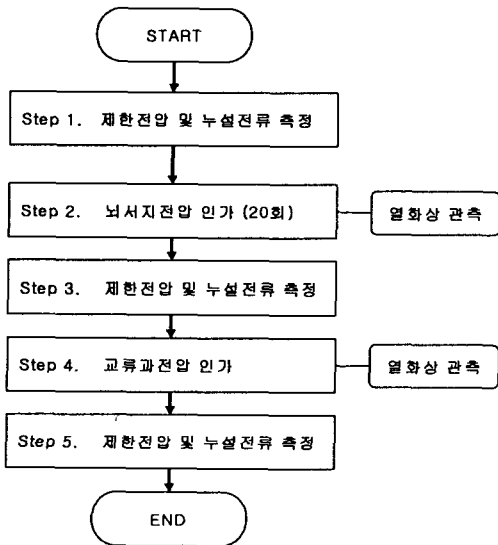
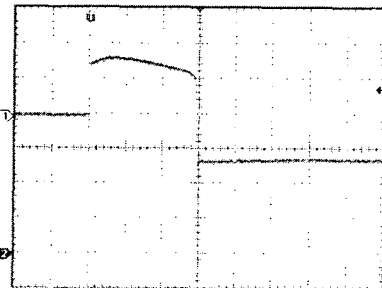


그림 1. 바리스터 특성시험 절차
Fig.1. Test procedure of varistor

2.2. 실험에 사용된 바리스터의 기초 특성

그림 1의 Step 1에서는 뇌서지전압이나 교류과전압을 인가하기 이전에 사용된 각각의 바리스터 특성을 평가하기 위하여 제한전압과 누설전류를 측정하였다. 그림 2는 바리스터의 일반적인 특성을 나타낸 파형이며, 바리스터의 제한전압과 서지전류로 바리스터의 동작특성이 결정된다. 이러한 바리스터의 조합에 있어서 최대 연속동작 전압(U_c)을 높이기 위하여 두개 또는 그 이상의 바리스터를 직렬로 연결하여 사용하기도 한다. 또한 전원계통에 따라서 상과 중성선 또는 상과 상 사이의 연결에 따라 바리스터가 직렬로 접속되기도 한다. 바리스터의 병렬연결은 최대방전전류를 높이기 위해 사용되며, 각각의 소자에 분류되는 전류값에 의해 열적 안정성이 차이를 보이기도 한다.

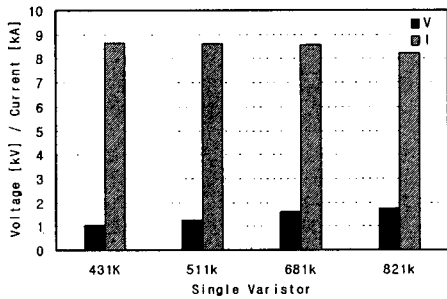
그림 3에는 단독 또는 직·병렬조합의 바리스터에 대하여 각각의 바리스터 특성을 파악하기 위하여 뇌서지 전압을 인가하여 제한전압과 방전전류 측정된 결과를 나타내었다. 그림 3(a)에 나타낸 단일소자의 특성에서는 바리스터의 최대연속동작전압(U_c)가 높을수록 제한전압(U_{res})이 높게 나타나며, 최대방전전류는 조금씩 감소하고 있다. 그림 3(b)에는 431K 단일소자 2개를 직렬 연결하여 이와 제한전압 특성이 유사한 821K 단일소자와 제한전압 특성을 비교하였다. 또한 실제의 220 [V] 선로에서 많이 사용되는 511K 단일소자를 직렬로 연결하여 함께 비교하였다. 제한전압은 제품의 규격과 일치하게 821K, 431K-2S, 511K-2S 순으로 높아지는 것을 알 수 있다. 방전전류에 있어서는 제한전압이 높아질 수록 조금씩 작아지는 결과를 나타내었다.



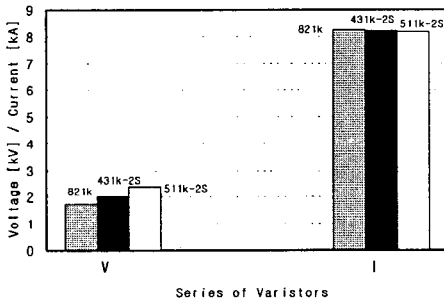
1. 제한전압 파형[500 V/div, 10 μ s/div]
2. 서지전류 파형[2 kA/div, 10 μ s/div]
그림 2 뇌서지 전류와 제한전압 파형
Fig.2. Waveforms of surge current and limiting voltage

그림 3(c)에는 I_{max} 가 10 [kA]인 511K(10kA) 소자 4개를 병렬연결한 경우와 I_{max} 가 40 [kA]인

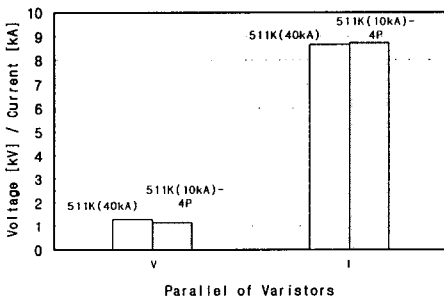
511K 단일소자와의 제한전압과 방전전류를 비교하여 나타내었다. 동일한 U_c 와 I_{max} 값을 가지도록 병렬 조합한 경우라도 그림에서 보는 바와 같이 제한전압과 방전전류는 어느 정도 차이를 보인다. 특히 제한전압에 있어서는 전류용량이 작은 바리스터 4개를 병렬로 조합하는 경우가 단일 바리스터에 비하여 다소 낮은 값으로 측정되었다.



(a)단일소자의 제한전압측정



(b)직렬조합소자와 단일소자의 제한전압비교



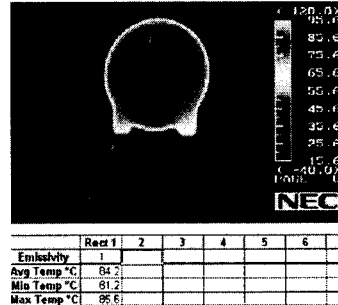
(C)병렬조합소자와 단일소자의 제한전압비교

- ① 431K : $U_c=275$ V, $U_{res}=710$ V, $I_{max}=40$ kA
- ② 511K : $U_c=320$ V, $U_{res}=845$ V, $I_{max}=40$ kA
- ③ 681K : $U_c=420$ V, $U_{res}=1120$ V, $I_{max}=40$ kA
- ④ 821K : $U_c=510$ V, $U_{res}=1355$ V, $I_{max}=40$ kA
- ⑤ 431K-2S : series of two 431Ks
- ⑥ 511K-2S : series of two 511Ks
- ⑦ 511K(10kA): $U_c=320$ V, $U_{res}=845$ V, $I_{max}=10$ kA
- ⑧ 511K(10kA)-4P : parallel of four 511Ks
- ⑨ 511K(40kA) : single 511K

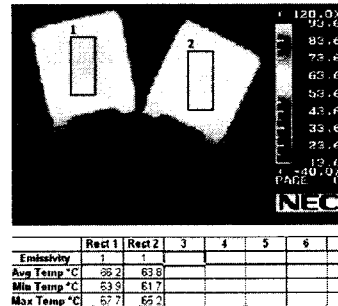
그림 3 직렬 병렬 조합소자와 단일소자의 제한전압 비교
Fig.3. Comparative limiting voltage of series and parallel assembly devices

2.3. 뇌서지 전압에 대한 바리스터 특성

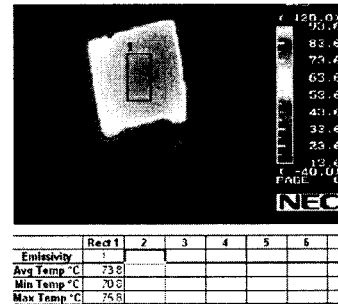
뇌서지 전압에 의한 바리스터의 내성시험은 그림 1의 Step 2에 해당하는 시험으로 정상상태의 바리스터 제한전압 측정 후 뇌서지 전압에 의한 전기적 스트레스를 모의하였다.



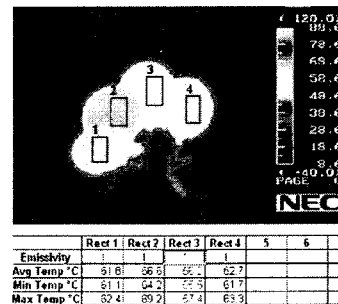
(a) 821K



(b) 431K-2S



(c) 511K(40kA)



(d) 511K(10kA)-4P

그림 4. 뇌서지 전압에 대한 바리스터 표면온도
Fig.4. Temperature of SPD surface to surge voltage

뇌서지 전압 20 [kV](1.2/50 μ s)를 2 [Ω]의 출력 저항을 통하여 바리스터에 각각 20회씩 인가면서 열화상카메라로 온도변화를 측정하였다. 바리스터의 열화상 그래프는 NEC사의 열화상카메라를 사용하여, 바리스터 내부의 온도상승이 심한 부분에 대해 최고온도, 평균온도로 분석하였다. 이러한 온도변화는 바리스터의 열적 안정성을 나타내는 중요한 파라미터이며, 바리스터의 수명과도 직결된다. 또한 바리스터는 고장에 이르면 누설전류가 급격히 증가하며 온도가 매우 급격히 상승하므로 화재사고를 초래할 수도 있기 때문에 온도변화의 관측은 매우 중요하다.

그림 4는 서지전압을 인가하였을 때 단일소자 바리스터와 직렬 또는 병렬로 연결된 바리스터와의 온도변화를 비교한 것이다. 그림 4(a)는 821K 단일 바리스터의 열화상 사진으로서 20 [kV]의 1.2/50 μ s 서지전압을 20회 인가한 직후에 촬영하였다. 바리스터 중앙부의 4각형 영역에서 최고온도는 85.6 $^{\circ}$ C이며, 평균온도는 84.2 $^{\circ}$ C로 관측되었다. 그림 4(b)는 431K 바리스터 2개를 직렬 연결하였을 때의 열화상 사진으로 최고온도 67.7 $^{\circ}$ C이며, 온도상승이 보다 큰 쪽의 평균온도는 66.2 $^{\circ}$ C로 관측되었다. 821K 단일인 경우에 비하여 431K 바리스터 2개를 직렬로 연결하여 사용하는 경우가 동일한 뇌서지 전압에 대하여 보다 넓은 표면적을 가지게 되어 열적안정성이 뛰어난 것으로 분석된다.

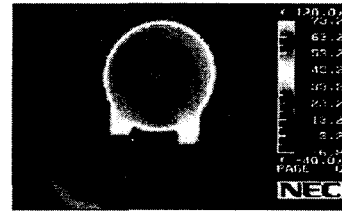
그림 4(c)와 (d)는 바리스터를 병렬로 연결하였을 때의 열화상을 관측한 결과를 나타낸 것이다. 단일 바리스터를 사용할 경우보다 4개의 바리스터를 병렬로 조합하여 사용하는 경우가 전반적으로 온도가 낮게 측정되었다. 하지만 그림 4(d)에서 보는 바와 같이 바리스터를 병렬로 연결하는 경우에 전류가 분류되는 비율이 서로 다르면 온도분포도 각각의 바리스터마다 차이를 보이게 되고 특정 바리스터에 과도한 전류가 흘러 열적폭주가 발생할 가능성도 존재한다.

2.4. 교류 과전압에 대한 바리스터 특성

바리스터는 뇌서지 전압에 1차열화 후 교류과전압 또는 정상전압에 의해서도 열화가 가속된다. 따라서 교류과전압 인가에 따른 바리스터 2차 열화를 모의하고 동시에 바리스터의 열적 안정성을 관찰하기 위하여 교류전압을 U_c 에서부터 서서히 높여가면서 누설전류와 온도변화를 관측하였다. 각각의 바리스터 조합에서 교류과전압에 대한 누설전류는 최대 1 [A]까지 증가시키면서 실험을 진행하였다. 이때의 온도변화를 관측한 결과는 그림 5와

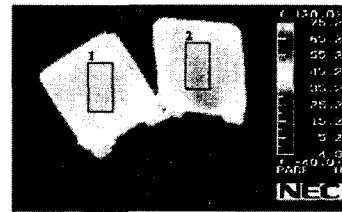
표 1에 나타내었다.

바리스터의 직렬조합에서 교류과전압에 의한 바리스터의 최고온도는 서지전압에 대한 최고온도와 비교할 때 약 14 $^{\circ}$ C 낮게 측정되었다. 직렬조합의 경우가 단일 바리스터에 비하여 열적 안정성이 우수하게 나타나는 현상은 서지전압에 대한 경우와 유사하게 나타났다.



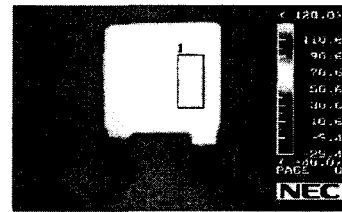
	Rect 1	2	3	4	5	6
Emissivity	1					
Avg Temp °C	83.6					
Min Temp °C	58.2					
Max Temp °C	85.7					

(a) 821K



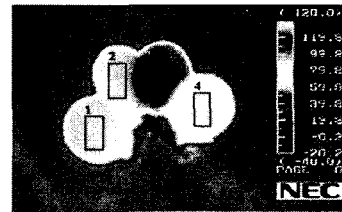
	Rect 1	Rect 2	3	4	5	6
Emissivity	1	1				
Avg Temp °C	49.6	61.7				
Min Temp °C	47.7	59.9				
Max Temp °C	50.8	53.3				

(b) 431K-2S



	Rect 1	2	3	4	5	6
Emissivity	1					
Avg Temp °C	74.9					
Min Temp °C	53.1					
Max Temp °C	77.6					

(c) 511K(40kA)



	Rect 1	Rect 2	Rect 3	Rect 4	5	6
Emissivity	1	1	1	1		
Avg Temp °C	51.1	96.6	113.3	83.9		
Min Temp °C	25.0	32.6	108.8	81.7		
Max Temp °C	53.7	96.7	119.0	85.3		

(d) 511K(10kA)-4P

그림 5. 교류과전압에 대한 바리스터 표면온도
Fig.5. Temperature of SPD surface to ac over-voltage

표 1. 전원전압 변동에 따른 여러 가지 종류 안정 기의 (Ix/W) 변화

Table 1. Measured surface temperature of varistor according to the increase of leakage current

누설전류 바리스터		표면온도 (°C)				
		0.1A	0.25A	0.5A	0.75A	1A
431K-2S	max.	26.0	28.2	33.4	39.9	53.3
	avg.	25.8	27.8	32.4	38.2	50.4
821K	max.	32.3	35.2	43.0	50.9	65.7
	avg.	31.6	33.9	39.5	46.4	57.8
511K (10kA)-4P	max.	35.9	55.0	74.0	118.0	121.6
	avg.	31.9	49.4	62.4	99.6	99.9
511K (40kA)	max.	34.1	41.4	56.4	73.8	77.5
	avg.	32.4	37.0	48.2	61.0	68.3

바리스터의 병렬조합에 대한 온도분석 결과는 단일 바리스터에 비하여 특정 바리스터로 누설전류가 편중되고, 최고온도가 다른 바리스터에 비하여 약 20%정도 상승하는 결과를 나타내었다. 이러한 결과는 병렬로 접속하는 바리스터는 직렬로 접속하는 바리스터와는 다르게 각각의 특성차이에 의하여 방전전류 또는 누설전류가 다른 값으로 분류되어 나타나기 때문이다. 즉, 미세구조의 복잡한 특성에 의하여 물리적, 화학적, 전기적 특성이 결정되어지는 바리스터의 특성상, 완벽하게 동일한 특성을 가지기가 힘들기 때문에 누설전류 증가에 따라 4개의 소자사이에 전류의 불균형을 이루며, 1개의 소자에서 온도가 급격히 상승하는 현상이 발생하는 것으로 생각된다.

그림 5(d)에서 실제로 분류되는 전류를 측정해 본 결과 온도상승이 높은 3번 바리스터에 다른 바리스터에 비하여 큰 전류가 흐름을 확인할 수 있었다. 결과적으로 바리스터를 병렬로 접속하는 경우에는 열리 복사되는 표면적의 증가로 열적안정성이 떨어날 수도 있지만 특정 바리스터가 열화가 급속히 진전되어 전체적인 열적 안정성을 떨어뜨리기도 함으로 사용에 주의하여야 한다.

3. 결론

본 연구에서는 서지보호기의 특성을 결정짓는 소자인 바리스터의 직렬 혹은 병렬로 조합하여 사용할 때 나타나는 제한전압특성, 열적안정성, 누설전류 특성시험을 수행하였다.

바리스터의 직렬조합은 적절한 제한전압을 가지는 바리스터로 구성할 경우 단일 바리스터를 사용할 때와 비교하여 제한전압이나 누설전류 측면에

서도 큰 차이를 나타내지 않았다. 열적 안정성 측면에서는 직렬로 접속하는 경우가 열이 방사되는 표면적을 증가시키므로 보다 안정적인 것으로 나타났다. 바리스터의 병렬조합은 단일 바리스터와 비교할 때 열적 안정성 측면에서 특정 바리스터 부분으로 전류가 집중되어 표면온도가 급격히 증가하는 경우가 존재하였다.

따라서 이러한 바리스터 조합특성을 잘 판단하여 SPD에 적용한다면 SPD특성을 향상시킬 수 있으며, ZnO바리스터의 단락으로 인해서 2차적인 사고가 발생하는 것을 방지할 수 있으며, 보호대상 기기의 신뢰성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구는 산업자원부 지원에 의하여 한국전기안전공사(과제번호: R-2005-C-069)주관으로 수행된 과제임.

참 고 문 헌

- [1] Keith W. Eilers, Mark Wingate, and Eric Pham, "Application and Safety Issues for Transient Voltage Surge Suppressors", IEEE Tras. on IA, Vol. 36, No. 6, pp.1734~1740, 2000.
- [2] Roberto Siegert and Osama A. Mohammed, "Selection of Varistor for Gurge Protection Purpose based on their Voltage-Current Characteristic", Proc. of IEEE 2000, pp.162~165, 2000.
- [3] Tom Mueller and David Graff, "The Use of Surge Protection Devices in the Petroleum/Petrochemical Industry", IEEE Trans. on IA, Vol. 34, No.6, pp.1351~1358, 1998.
- [4] IEC61643-1, Surge protective devices connected to low-voltage power distribution systems-Performance requirements and testing methods, pp.73~93, 2001.