

뇌충격전류에 의한 산화아연형 바리스터의 전기적 특성변화

이종혁* · 손원진 · 김명진 · 길경석

한국해양대학교 전기공학과

Changes of Electrical Characteristic of ZnO Varistors by a Lightning Impulse Current

Jong-Hyuk Lee* · Won-Jin Son · Myung-Jin, Kim · Gyung-Suk Kil

Dept. of Electrical Engineering, Korea Maritime University

E-mail : hvlab@eng.kmaritime.ac.kr

ABSTRACT

This paper describes the effect of lightning impulse current on ZnO varistors(390 V, 6.5 kA) used in low-voltage AC mains as a protective device against transient overvoltages.

A lightning impulse current standardized in IEC 61000-4-5 is applied to the varistors, and the energy applied to the varistor at each time is about 12 J.

In the experiment, various parameters such as leakage current, reference voltage are measured with the number of applied impulse current. Also, micro-structure changes of the varistors after applying the lightning impulse current of 200 times are compared.

The electrical characteristics of the varistors are degraded by overtime impulse current, showing increase in leakage current and decrease in reference voltage.

1. 서론

고밀도 집적회로기술의 급속한 발달로 전기·전자·통신기기가 소형·경량화, 고기능화되면서 기능상 외부의 과도전압이나 노이즈에 현저한 취약성을 보이고 있다. 이에 대한 보호대책으로 전기·전자기기의 전원 및 신호·통신선로에 가스 튜브, 아발란시 다이오드, 바리스터 등의 비선형 저항 특성을 갖는 보호 소자를 사용하고 있다[1].

특히, 전원회로에 침입하는 과도전압 억제 대책으로는 에너지 내량이 크고, 동작속도가 빠른 산화아연형 바리스터(Zinc Oxide Varistor, 이하 바리스터)를 사용하고 있다. 바리스터는 비선형 저항 특성이 양호하고, 가격대비 성능이 우수하여 전원회로의 과도전압에 대한 보호대책으로 광범위하게 사용되고 있다.

바리스터는 과도전압에 대한 지속적인 보호동작으로 열화되며, 최종적으로는 파괴에 이르게 된다. 바리스터가 파괴에 이르게 되면 단락상태가 되기 때문에 과도한 전류가 부하 및 전원측에 흘러 2차적 사고를 유발하기도 한다. 따라서 열화된 바리스터를 적절한 시기에 교체하여 바리스터에 의한 2차 사고를 방지하여야 한다[2],[3].

현재까지 고압 송·배전 선로에 설치되는 바리스터의 열화진전에 관한 연구는 활발히 진행되고 있으나, 저압선로의 바리스터 열화에 관한 연구는 수행된 바가 없다.

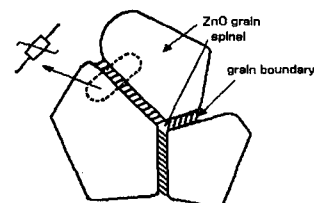
본 연구에서는 저압선로에 설치되는 바리스터의 열화에 따른 특성변화를 분석하기 위하여 인

위적으로 뇌충격 전류를 인가하고, 열화진전에 따른 바리스터의 전기적 특성변화 및 미세구조 변화를 분석하였다. 실험결과로부터 바리스터의 열화진전에 따른 전기적 특성변화를 이해함으로써 바리스터의 수명 및 신뢰성 평가에 필요한 기초적 자료를 확보할 수 있었다.

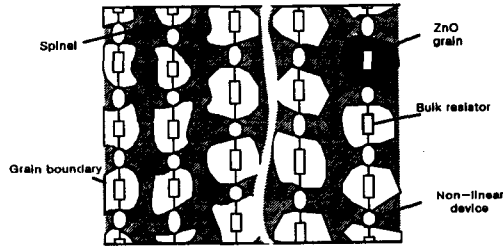
II. 바리스터의 구조 및 열화진전기구

1. 바리스터의 미세구조

저압용 바리스터의 미세구조는 그림 1의 (a)와 (b)에 나타낸 것과 같이 세라믹 다결정체로써 ZnO 입자, 스피넬(spinel), 입계층의 3가지 결정상으로 구성되어 있다. 바리스터의 주성분인 ZnO 입자는 10~20 μm 정도의 균일한 크기이며, 순수한 ZnO와는 달리 쌍을 이룬 형상으로 n형의 반도체성을 가지고 있다.



(a) 단일 구조



(b) 복합 구조

그림 1 ZnO 바리스터의 미세구조
Fig. 1 Micro-structure of a ZnO varistor

스피넬은 ZnO 입자사이에 존재하는 물질로 높은 저항성을 가지고 있으며 ZnO 입자의 성장을 제한하는 역할을 하지만 소자에서 특별한 전기적 역할은 하지 않는다. 입계층(boundary)은 Bi₂O₃ 중심의 첨가물을 가진 ZnO 입자를 둘러싸고 ZnO 소자의 비선형 저항특성과 누설전류의 크기에 영향을 미치는 10 nm보다 작은 층으로, 소자의 열화시 가장 큰 변화를 보인다[4].

2. 열화진전 기구

바리스터를 열화시키는 원인으로 상용주파수 교류 과전압과 뇌충격전류로 구분할 수 있다. 상용주파수 교류 과전압에 의한 열화는 바리스터에 교류전압을 인가하게 되면 누설전류가 흐르게 되고, 누설전류에 의해 소자에 열이 발생한다. 누설전류는 크게 용량분 누설전류와 저항분 누설전류로 구분되며, 저항분 누설전류는 소자 내의 분자운동을 촉진시키기 때문에 소자의 온도를 상승시키게 된다. 일정 전압에서 온도가 증가하면 저항분 누설전류의 값은 식 (1)과 같이 된다.

$$I_r = A \exp\left(-\frac{Q}{KT}\right) \quad [A] \quad (1)$$

여기서, Q : 활성화 에너지, K : 볼츠만 상수, T : 절대온도, A : 상수

저항분 누설전류가 흐르는 원인으로 바리스터에 전계가 가해진 경우 열적으로 활성화된 이온의 확산이 일어나고, 이 이온이 입계층을 넘어가므로 입계의 저항이 작게되어 입계의 전위장벽이 작아져 저항분 누설전류의 증가가 일어난다. 즉, 열화가 전위장벽의 변형에 의하여 발생함을 나타내고 있으며 일반적으로 동일한 소자에 대해 온도 및 과전압이 높은 동안 열화가 진전되어 저항분 누설전류가 증가한다. 저항분 누설전류가 어떤 값을 초과하면 열 발생이 커져 짧은 시간에 소자는 열폭주에 도달한다.

뇌충격전류에 의한 열화는 상용주파수 교류 과전압에 의한 열화기구와는 다르며, 바리스터의 비선형 저항특성을 저하시켜 보호성능에 크게 영향을 준다. 뇌충격전류의 경우 바리스터의 입계층에 가해지는 전계강도가 정상상태와 비교하여 상당히 크기 때문에 소자의 보호동작으로 열이 발생하고 입계층의 변형을 일으키게 된다. 만일 바리스터가 불균일한 구조적 결함을 포함하고 있으면, 부분적인 열의 집중이 발생하게 되고 소자의 용융에 의한 재소결이 일어나게 된다. 이와 같은 과정에서 ZnO 입자가 성장하고 입계층이 감소하면 소자는 정상상태의 운전전압에서도 가열되어 열폭주에 이르게 된다.

국내의 전원계통은 교류과전압이 없는 안정된 전압이 공급되므로 바리스터의 열화요인은 대부분 뇌과전압에 의한 것으로 발생된다.

III. 실험장치 및 방법

바리스터의 열화의 주된 요인은 외부로부터의 뇌과전압에 의한 것으로 그림 2와 같이 실험장치를 구성하여 뇌충격전류를 인위적으로 인가하고 바리스터의 특성변화를 분석하였다. 실험에 사용한 시료는 공칭전압 390 V, 전류내량 6.5 kA의 바리스터를 사용하였다.

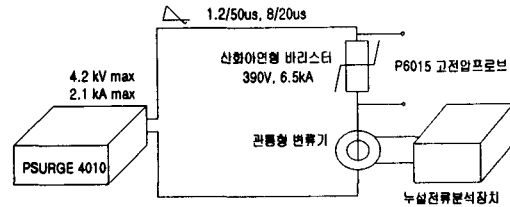


그림 2 실험장치의 구성
Fig. 2 Experimental set-up

뇌충격전류의 인가는 국제규격의 서지 발생장치(PSURGE 4010, Haefly, 1.2/50 μs 4.2 kV_{max}, 8/20 μs 2.1 kA_{max})를 이용하였으며, 220 V의 교류 전압이 인가된 상태에서 위상각 90°의 위치에 4 kV의 과도전압을 중첩시켰다[5]~[7]. 이 때 바리스터를 흐르는 뇌충격전류는 약 1.54 kA가 된다. 뇌충격전류를 1분 단위로 바리스터에 인가하면서 제한전압과 방전전류를 측정하였으며, 20회마다 바리스터를 충분히 냉각시킨 후 정격전압과 운전전압에서 전체 누설전류와 3조파 누설전류를 측정하였다.

바리스터 양단의 제한전압의 측정은 1000 : 1 고전압프로브(Tek. P6015, 40 kV DC ~ 70 MHz)로 하였으며, 방전전류의 검출은 서지 발생장치에 내장되어 있는 전류 측정단자를 이용하였다. 전체 누설전류와 3조파 누설전류는 관통형 변류

기로 구성된 누설전류 분석장치를 이용하였다. 누설전류의 변화이외에도 동작개시전압, 표면온도 등을 측정하였으며, 최종적으로 200회까지 인가한 바리스터는 광학적 분석을 위하여 주사전자현미경(SEM)으로 미세구조 변화를 검토하였다.

IV. 실험결과 및 고찰

바리스터의 열화진전에 따른 특성분석을 위하여 8/20 μ s 1.54 kA의 뇌충격전류를 인가하면서 바리스터의 제한전압, 방전전류, 누설전류 및 동작개시전압 등의 변화를 분석하였다.

그림 3은 바리스터의 보호동작시 나타나는 제한전압과 방전전류의 파형을 나타낸 것으로 파형에서 전압, 전류에 의한 에너지를 계산하면 한번의 뇌충격전류가 인가될 때마다 약 11.65 J의 에너지가 바리스터에 전달된다. 바리스터는 지속적인 보호동작에 따라 열화되고, 열화진전에 의해 누설전류나 동작개시전압의 변화를 가져오게 된다.

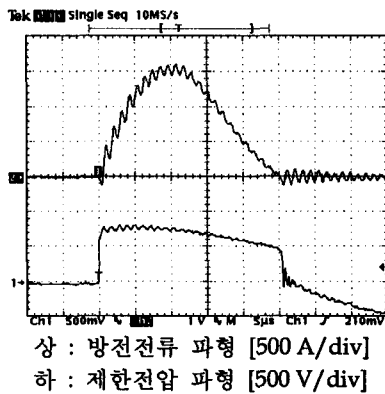


그림 3 뇌충격 전류 파형 예
Fig. 3 Typical waveforms of a lightning impulse current

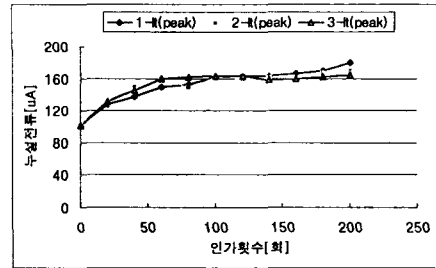
그림 4는 뇌충격전류 인가에 따른 누설전류의 변화를 나타낸 것으로 20회마다 정격전압에서 전체 누설전류와 3조파 누설전류를 측정하였다. 3조파 누설전류는 바리스터의 저항분 누설전류의 증가에 따라 그 성분이 증대되는 것으로 알려져 있으며 바리스터의 열화에 따른 특성변화에 중요한 요소이다.

전체 누설전류의 경우 뇌충격전류를 인가하지 않은 상태에서는 약 100 μ A 정도의 값을 나타내지만, 뇌충격전류를 인가함에 따라 점차 누설전류의 크기가 증가한다. 200회의 뇌충격전류를 인가하였을 경우 누설전류의 크기는 약 180 μ A 정도로 증가하였다.

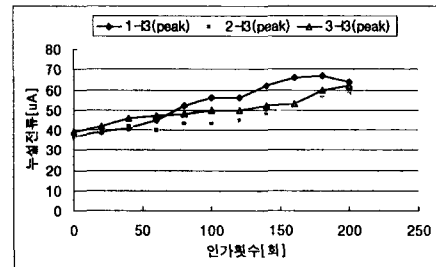
3조파 누설전류의 경우 초기에는 약 38 μ A 정도를 나타내지만 뇌충격전류 인가에 따라 점차 증가하여 200회의 뇌충격전류를 인가하였을 때에는

약 63 μ A까지 증가하였다.

바리스터의 열화진전에 따라 전체 누설전류 및 3조파 누설전류는 증가하는 양상을 나타내었다.



(a) 전체 누설전류



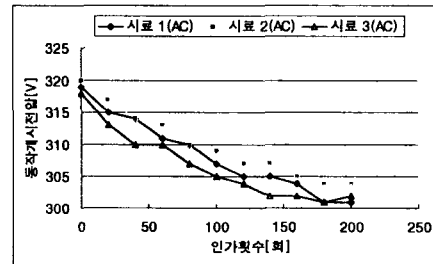
(b) 3조파 누설전류

그림 4 뇌충격전류에 의한 누설전류 변화
Fig. 4 Changes of leakage current to applied number of lightning impulse current

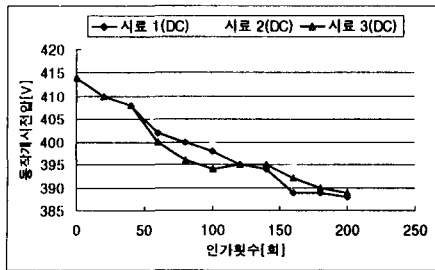
바리스터의 동작개시전압을 교류와 직류에서 측정하였으며, 뇌충격전류 인가에 따른 변화를 그림 5에 나타내었다.

먼저 교류에서의 동작개시전압은 초기에는 실효값 320 V 정도였으나, 뇌충격전류 인가에 따라 점차 감소하여 200회 인가후에는 약 300 V 정도로 낮아졌다. 직류에서도 마찬가지로 초기에는 414 V였으나 200회 인가후에는 약 390 V 정도를 나타내었다.

따라서 바리스터의 열화진전에 따라 동작개시전압은 교류, 직류에 상관 없이 다소 낮아지는 추이를 나타내었다.



(a) AC

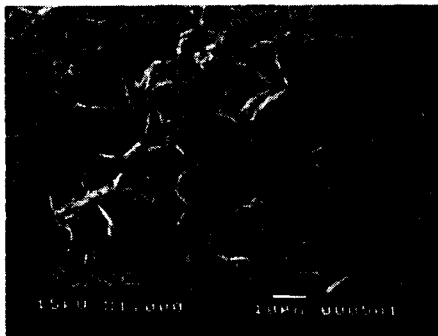


(b) DC

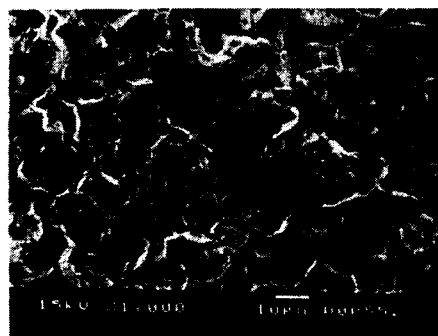
그림 5 뇌충격전류에 의한 동작개시전압 변화
Fig. 5 Changes of reference voltage to applied number of lightning impulse current

뇌충격전류 인가에 따른 바리스터의 물리적 구조변화를 검토하기 위해 주사전자현미경(SEM)을 사용하여 바리스터의 미세구조를 촬영하였으며, 사진을 그림 6에 나타내었다.

그림 6(a)는 신품 바리스터를 나타낸 것이며, 6(b)는 뇌충격전류를 인가한 열화된 바리스터를 나타낸 것이다.



(a) 뇌충격전류 인가전



(b) 뇌충격전류 인가후

그림 6 바리스터의 미세구조 변화
Fig. 6 Micro-structure changes of the varistors

뇌충격전류를 인가한 시료의 미세구조에서 ZnO 입자의 크기는 뇌충격전류 인가전과 비교하여 다소 증가한 것을 알 수 있었다.

V. 결론

본 연구에서는 저압용 바리스터의 특성분석을 통해 열화진단에 관한 기술을 확립하기 위하여 열화진전에 따른 전기적, 물리적 특성변화를 연구하였으며, 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 뇌충격전류 인가에 따라 전체 누설전류는 초기에 100 μ A에서 180 μ A로 현저한 증가 추이를 나타내었으며, 3조파 누설전류도 초기치 38 μ A에서 60 μ A로 증가하는 추세를 나타내었다.
2. 바리스터의 동작개시전압은 뇌충격전류 인가에 따라 서서히 감소하는 특성을 나타내었다.
3. 뇌충격전류 인가에 따른 바리스터의 미세구조 변화는 ZnO 입자는 성장하고 입계층은 다소 감소하는 경향을 나타내었다.

결론적으로 저압용 바리스터의 열화 정도는 전체 누설전류 및 3조파 누설전류의 증가, 동작개시전압의 감소로 판단할 수 있으며, 이러한 자료는 장기간에 걸쳐 관리되어야 할 것이다.

참고문헌

- [1] S. B. Smith and R. B. Standler, "The Effects of Surges on Electric Appliances", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 7, pp. 1275~1282, 1992.
- [2] N. Kuwabara, H. Koga and T. Motomitsu, "A New Lightning Surge Test Circuit for Telecommunications Equipment in Japan", IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, Vol. 30, No. 3, pp. 393~400, 1988.
- [3] M. Bartkowiak et al., "Failure Modes and Energy Absorption Capability of ZnO Varistors", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 14, No. 1, pp. 152~162, 1999.
- [4] S. S. Kershaw, G. L. Gaibrois, K. B. Stump, "Applying metal-oxide surge arresters on distribution systems", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 1, pp. 301~307, 1989.
- [5] IEC 61000-4-5, Surge immunity test, pp. 60~77, 1999.
- [6] IEEE C62.41 IEEE Recommended Practice on Surge Voltages in Low-Voltage AC Power Circuit, 1991.
- [7] ANSI/IEEE Std. C62.11, "Standard for Metal - Oxide Surge Arrester for AC Power Circuits", 1987