

배전용 ZnO 피뢰기 소자의 열적/전기적 파라미터 분석에 관한 연구

(A study on analysis of thermal and electrical parameters of the ZnO arrester block)

이복희 · 이수봉* · 이승주 · 전병욱 · 김동성

(Bok-Hee Lee · Su-Bong Lee · Seung-Ju Lee · Byung-Wook Jeon · Dong-Sung Kim)

Abstract

This paper presents the thermal and electrical characteristics of ZnO arrester blocks under the AC voltages. The leakage currents of ZnO arrester blocks were measured as a function of time. The temperature distributions of ZnO arrester blocks were observed by the forward looking infrared camera. The degradation and thermal runaway of ZnO arrester blocks were closely related with the temperature limit of ZnO arrester blocks which decided heat generation and dissipation. As a result, the degradation and thermal runaway of ZnO arrester blocks depend on the temperature and leakage current of ZnO arrester blocks.

Keywords: ZnO arrester block, Temperature limit, Leakage current, Degradation, Thermal runaway

1. 서론

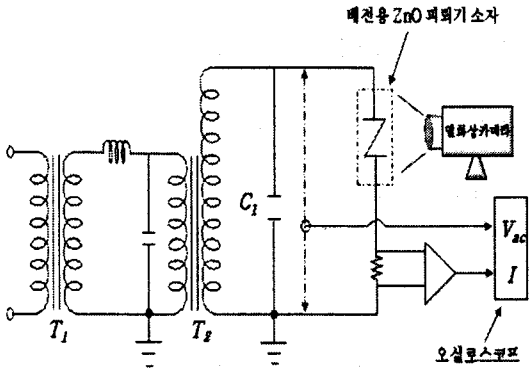
산화아연(ZnO) 피뢰기는 우수한 서지 보호 특성을 가지고 있어 급속도로 전력시스템에 적용되어 사용되고 있다. 일반적으로 산화아연 피뢰기의 수명 예측은 온도상승에 따른 ZnO 피뢰기 소자의 내전압특성에 의해 평가되어지고, 대개 수명이 끝나는 부분에서 열폭주가 일어나게 된다.[1~3]

ZnO 피뢰기 소자의 온도가 서지 에너지의 흡수에 의해 온도한계를 초과하게 되면 이후의 AC전압에 의한 지속적인 스트레스로 인한 누설전류 증가로 열발생 증가와 더불어 열화현상이 발생하게 된다. 이러한 열화현상은 열발생과 열손실 사이의 관계로 해석할 수 있으며, ZnO 수명을 예측하기 위한 열화기구의 해석은 매우 중요한 요소가 된다.[4][5] 본 연구에서는 60 [Hz] 교류전압에 대한 ZnO 피뢰기 소자의 열적/전기적 특성을 파악하기 위해 시간에 따른 누설전류의 변화를 측정하였으며, 열화상카메라를 이용하여 ZnO 피뢰기 소자에서 나타나는 온도분포를 관측하였다. 특히, ZnO 피뢰기 소자의 열적/전기적 특성의 상관성을 실험적으로 분석하였으며, 이를 바탕으로 ZnO 피뢰기 소자의 열발생 및 열방출에 의한 열화기구를 해석하였다.

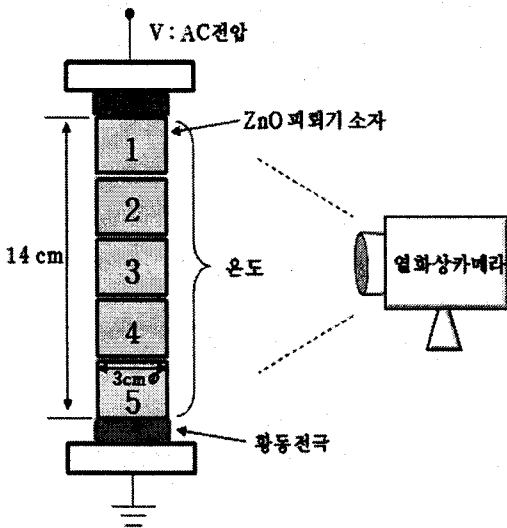
2. 실험측정계의 구성 및 실험방법

2.1. 실험장치 및 측정계의 구성

시험용 시료는 정격전압과 공칭방전전류가 각각 18 [kV], 2.5 [kA]의 15년 동안 상시운전전압에서 스트레스를 받은 배전용 피뢰기에서 채취하였다. 배전용 피뢰기 내부에 직렬로 접속된 5개의 ZnO 피뢰기 소자만을 배전용 피뢰기로부터 분리하여 ZnO 피뢰기 소자에서 나타나는 열적/전기적 특성을 분석하였다. 그림 1에 실험측정계의 구성도를 나타내었다. 그림 1(a)는 60 Hz의 교류전압을 약 50 [kV]까지 발생시킬 수 있는 교류전압 발생장치이다. ZnO 피뢰기 소자의 인가전압과 누설전류의 측정에는 디지털 오실로스코프(BW 1[GHz], 5[Gs/s] 4채널), 수동형 고전압 프로브(BW 75[MHz], 감쇠율 1000X, 최대입력 DC 20kV), 능동형 FET 프로브(BW 1 [MHz], 감쇠율 1/10, 최대전압 ±15 [V])를 사용하였다.



(a) 60 [Hz] AC 발생장치의 개략도



(b) ZnO 피뢰기 소자의 전극 배치도

그림 1 실험측정계의 구성
Fig. 1. Circuit diagram of the direct and 60 Hz alternating, mixed voltage generator

그림 1(b)에 ZnO 피뢰기 소자의 전극 배치도를 나타내었다. 시험에 사용된 ZnO 피뢰기 소자는 정격 전압과 공칭방전전류가 각각 3.6 [kV], 2.5 [kA]이며, 직경이 30 [mm], 두께가 28 [mm]인 ZnO 피뢰기 소자 5개를 직렬로 시험용 지그에 설치하였다. 각각의 ZnO 피뢰기 소자에서 나타나는 열적 특성을 관찰하기 위해 열화상카메라(100,000 [fps] 이상의 컬러 디지털 이미지 촬영, 4 [GB] 이상의 메모리)를 사용하였으며, 실험실 주변온도는 18.3 [°C]로 일정하게 유지하였다. 각각의 ZnO 피뢰기 소자에서의 온도분포는 평균값으로 열화상카메라의 메모리에 저장되었다.

2.2. 실험방법

전력 시스템에 큰 서지 에너지의 흡수가 발생될 때 ZnO 피뢰기 소자의 온도는 상승하고 저항은 감소하게 된다. 그 결과 누설전류가 증가하게 되고 ZnO 피뢰기 소자 내부의 열발생이 급격히 증가하게 된다. 그림 2에 ZnO 피뢰기 소자의 열적 특성 변화 곡선을 나타내었다. 그림 2에서 어떤 온도 한계 이하(T_1)에서 ZnO 피뢰기 소자의 열발생(발열)은 열손실(방열)보다 작아 B곡선에서 볼 수 있듯이 ZnO 피뢰기 소자의 온도는 점차 감소하게 되어 안정한 상태가 된다. 반면에 어떤 온도 한계를 초과(T_2)하게 되면 ZnO 피뢰기 소자의 열발생은 열손실보다 커서 A곡선과 같이 끝부분에서 열화가 발생하고 결국에는 열폭주에 이르게 된다.[4]

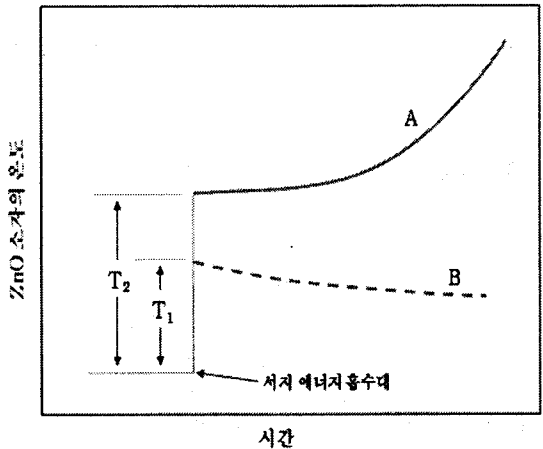


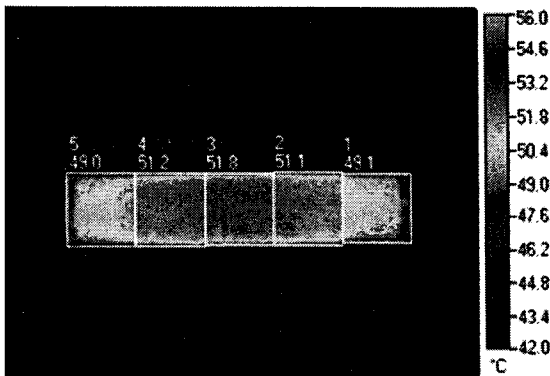
그림 2 ZnO 피뢰기 소자의 열적 특성곡선
Fig. 2. Thermal characteristic curve of ZnO arrester blocks

따라서 본 연구에서는 이러한 ZnO 피뢰기 소자의 열적, 전기적 특성의 상호 연관성에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 온도한계 조건으로 0.5 [mA], 0.7 [mA], 1 [mA]의 누설전류를 ZnO 피뢰기 소자에 일정하게 흘려주고 온도한계를 초과할 때까지 60 [Hz] 교류전압을 최소 1시간에서 최대 6시간동안 유지하였다. 이 때 ZnO 피뢰기 소자에서 나타나는 열적 특성을 관찰하였고, 누설전류 및 저항과 같은 ZnO 피뢰기 소자에서의 전기적 특성과 열적 특성 사이의 상관성에 대해 검토하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. ZnO 피뢰기 소자의 열적 특성

두 전극 사이에 ZnO 피뢰기 소자 5개를 직렬로 연결하고 최소 1시간에서 최대 6시간 동안 각각의 소자에서 나타나는 온도분포를 실험적으로 조사하였다. 그림 3은 누설전류의 크기에 따라 1시간 경과 후 열화상 카메라에 의해 측정된 ZnO 피뢰기 소자의 온도분포를 나타내었다. 시험용 ZnO 피뢰기 소자에 교류전압을 인가했을 때 ZnO 피뢰기 소자를 통해 저항성 누설전류가 흐르기 시작하는 시작점의 크기가 0.5 [mA]일 경우에 대해 모의하였다. 각각의 ZnO 피뢰기 소자는 다양한 온도분포를 보이며, 특히 1번과 5번 ZnO 피뢰기 소자의 온도가 가장 낮게 나타나고 중앙에 배치된 3번 ZnO 피뢰기 소자의 온도가 가장 높게 나타났다. 이러한 현상은 지그의 양 끝부분에 금속전극이 설치되어 있어 대부분의 열손실이 열전달성이 우수한 금속전극에 집중되어 열전달이 더욱더 잘 이루어지기 때문이다. 이에 반해 직렬 접속된 ZnO 피뢰기 소자의 중앙부분에서는 ZnO 피뢰기 소자가 서로 접촉하고 있어 열전달이 거의 이루어지지 않고, 열발생이 중앙의 ZnO 피뢰기 소자에 집중되기 때문에 다른 소자에 비해 높은 온도를 나타내는 것으로 사료된다.



0.5 [mA], 1시간 경과

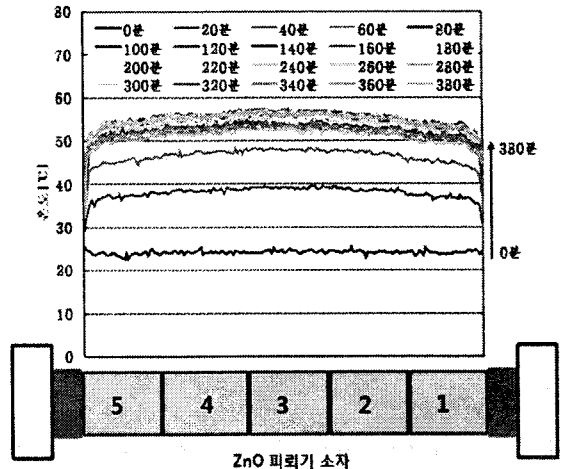
그림 3 누설전류의 크기에 따른 열화상 카메라에 의해 측정된 ZnO 피뢰기 소자의 온도분포

Fig. 3. Temperature distributions of ZnO surge blocks measured by forward looking infrared camera as an amplitude of the leakage current

그림 4는 시간의 변화에 따른 ZnO 피뢰기 소자의

온도분포를 나타내었다. 시작점 누설전류가 0.5 [mA]의 경우 실험을 시작한지 60분까지는 약 56 [°C]까지 온도가 다소 상승하였지만, 80분 이후에는 일정하게 유지되다가 240분이 지나는 지점에서는 ZnO 피뢰기 소자의 평균온도가 서서히 감소하는 특징을 보인다. 이러한 현상은 그림 2에서 설명한 것과 같이 ZnO 피뢰기 소자의 온도가 일정하게 상승하다가 온도한계 이하점에 도달하게 되면 온도는 안정하게 유지되고, ZnO 피뢰기 소자는 열발생과 열손실이 평형을 이루는 열평형 상태에 도달하게 되는 것이다. 이에 반해 시작점 누설전류가 1 [mA]의 경우 40분만에 ZnO 피뢰기 소자의 온도는 약 100 [°C]를 나타내었고, 80분만에 온도는 250 [°C]를 초과하였다. 이는 ZnO 피뢰기 소자가 온도한계를 초과하여 열손실보다 열발생이 커지게 되는 열불평형 상태에 놓이게 되고, 결국 ZnO 피뢰기 소자는 열화되어 열폭주가 일어나게 된다.

시작점 누설전류가 0.7 [mA]의 경우 온도의 상승을 3구간으로 나눌 수 있다. 먼저 실험을 시작한지 40분까지는 약 60 [°C]까지 온도가 다소 상승하였지만, 60분에서 220분까지는 20분에 약 5 [°C] 정도로 일정하게 상승하는 경향을 나타내었다. 이후 240분이 지나는 시점에서는 ZnO 피뢰기 소자의 평균온도가 급격히 상승하는 것으로 나타났다.



0.5 [mA]

그림 4 시간에 따른 ZnO 피뢰기 소자의 온도분포
Fig. 4. Temperature distribution of ZnO surge block as a function of the time

이 결과의 경우 열손실과 열발생의 과도기적인 변화 특성을 단적으로 보여주고 있다. 최초로 열발생

이 급격하게 커졌다가 온도한계점에 도달하게 되면 서서히 열손실과 열발생이 평형을 이루는 상태를 거쳐 최후에는 열발생이 급격하게 증가하게 되는 것이다. 결과적으로 열화기구의 해석을 통해 알아본 ZnO 피뢰기 소자의 열화 및 열폭주 현상은 열손실과 열발생을 결정짓는 ZnO 피뢰기 소자의 온도한계와 밀접한 관계가 있는 것을 확인할 수 있었다. 즉, ZnO 피뢰기 소자의 열화는 누설전류와 ZnO 피뢰기 소자의 온도에 상당히 의존적인 것으로 판단된다.

3.2 ZnO 피뢰기 소자의 열적/전기적 특성 사이의 관계

일반적으로 ZnO 피뢰기 소자에 60 [Hz]의 교류전압을 인가하게 되면 ZnO 피뢰기 소자를 통해 흐르는 누설전류는 저항성 누설전류와 용량성 누설전류로 나눌 수 있다. 이 때 용량성 전류는 ZnO 피뢰기 소자의 온도상승과는 관계가 없고 소자의 전압분포에만 기여하지만, 저항성 전류는 주열을 발생시켜 ZnO 피뢰기 소자 내의 분자운동을 촉진시키고, 온도상승을 가져오게 되어 ZnO 피뢰기 소자의 수명을 단축시킨다.

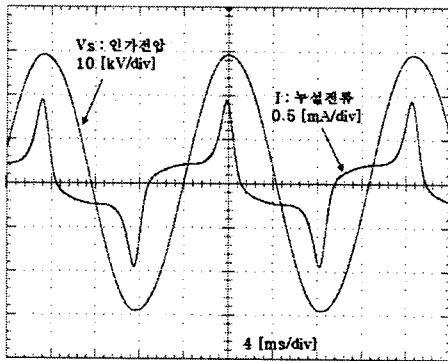


그림 5 시작점 0.7 [mA]에서 ZnO 피뢰기 소자의 인가전압과 누설전류 파형
Fig. 5. Waveforms of applied voltage and leakage current of ZnO arrester blocks at start point of 0.7 [mA]

온도의 상승은 전류의 증가를 가져오고 전류의 증가는 결국 저항의 감소를 가져오게 된다. 그림 5는 시작점 0.7 [mA]에서 나타나는 ZnO 피뢰기 소자의 인가전압과 누설전류의 대표적인 파형을 나타내었다. 누설전류의 경우 대부분이 저항성 누설전류이며, 이러한 저항성 누설전류를 ZnO 피뢰기 소

자에 일정하게 흘러줌으로서 ZnO 피뢰기 소자의 열적/전기적 특성의 평가가 가능하다.

4. 결론

ZnO 피뢰기 소자의 열적/전기적 특성의 상관성을 실험적으로 분석하였으며, 이를 바탕으로 ZnO 피뢰기 소자의 열발생 및 열방출에 의한 열화기구를 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

열화기구의 해석을 통해 알아본 ZnO 피뢰기 소자의 열화 및 열폭주 현상은 열손실과 열발생을 결정짓는 ZnO 피뢰기 소자의 온도한계와 밀접한 관계가 있다. 온도한계를 초과하는 경우(열발생>열손실) ZnO 피뢰기 소자는 열화가 발생하며 최후에는 열폭주에 도달하게 되지만, 온도한계 이하(열발생<열손실)에서는 ZnO 피뢰기 소자 내부가 열평형상태가 되어 안정하게 된다.

참고 문헌

- [1] S. Tominaga, Y. Shibuya, Y. Fujiwara, M. Imataki and T. Nitta, "Stability and long term degradation of metal oxide surge arresters", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No. 4, 1980
- [2] E. C. Sakushaug, J. S. Kresge, and S. A. Miske, Jr, "A new concept in station arrester design", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-96, No. 2, pp. 647-656, 1977
- [3] 이복희, 강성만, 박건영, "직류와 60 Hz 교류가 중첩된 전압에 대한 산화아연 피뢰기 소자의 누설전류 특성", Trans. KIEE, Vol. 54C, No. 1, JAN, 2005
- [4] S. Nishiwaki, H. Kimura, T. Satoh, H. Mizoguchi, S. Yanabu, "A study of thermal runaway/equivalent prorated model of ZnO surge arrester", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 2, 1984
- [5] K. Kobayashi, M. Mizuno, T. Aizawa, H. Hayashi, K. Mitani, "Development of zinc-oxide nonlinear resistors and their applications to gapless surge arresters ZnO surge arrester", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-97, No. 4, pp. 1149-1158, 1978