

외부 환경조건에 따른 ZnO 피뢰기의 전기적 특성의 변화

(Changes in Electrical Properties of ZnO Surge Arresters According to Surrounding Conditions)

이승주* · 이수봉 · 이복희

(Seung-Ju Lee · Su-Bong Lee · Bok-Hee Lee)

요 약

이 논문은 ZnO 피뢰기의 외부환경 변화에 따른 전기적 특성을 기술하였다. 뇌임펄스전류에 의한 ZnO 피뢰기의 열화특성을 분석하기 위해 8/20[μ s], 2.5[kA]의 임펄스전류를 시료에 인가하였다. ZnO 피뢰기의 누설전류를 다양한 외부 온도와 주수 상태에서 상용 주파수 교류 전압을 인가하여 측정하였다. 그 결과 임펄스전류의 인가횟수와 외부 온도가 증가함에 따라 누설전류가 증가하였고, 누설전류의 비대칭성도 뚜렷하였다. 또한 주수 시험에서 ZnO 피뢰기의 외피를 통하여 흐르는 전류는 피뢰기 소자의 누설전류보다 크게 나타났다. 본 연구의 결과는 피뢰기의 감시시스템 성능과 신뢰성 향상의 요소로 적용할 수 있다.

Abstract

This paper describes the electrical characteristics of ZnO surge arresters associated with the variation of surrounding conditions. To investigate the deterioration behaviors of ZnO surge arresters due to lightning surges, 8/20[μ s], 2.5[kA] impulse currents were injected to the ZnO surge arrester under test. The leakage currents of ZnO surge arrester subject to power frequency AC voltage were measured in different surrounding temperature and wet conditions. As a result, it was found that the leakage current is increased and its asymmetry is pronounced as the number of injection of the impulse current and the ambient temperature increase. Also, in the wet test, the outside leakage current flowing through the housing surface of the ZnO surge arrester is much larger than the intrinsic leakage current of ZnO surge arrester element. The results obtained in this work can be applied as factors of improving the reliability and performance of monitoring system for surge arresters.

Key Words : ZnO Surge Arrester, I-V curve, Wet test, Leakage current, Deterioration

1. 서 론

* 주저자 : 인하대학교 대학원 전기공학과 석사과정

Tel : 032-860-7398, Fax : 032-863-5822

E-mail : cloudwise@naver.com

접수일자 : 2008년 6월 17일

1차심사 : 2008년 7월 3일

심사완료 : 2008년 7월 15일

송·배전 전력계통에서는 일반적으로 낙뢰나 스위칭 서지 등과 같은 이상전압에 대하여 전력기기의 보호 및 절연 레벨의 저감을 위해 기술적, 경제적으

로 가장 효과적인 피뢰기를 사용하고 있다. 현재 피뢰기의 특성요소는 주로 산화아연(ZnO)소자이며, 산화아연 소자의 전압-전류 특성은 전류의 급격한 증가에도 전압이 거의 일정하게 유지되는 비선형성이 매우 중요한 역할을 한다. 이러한 전압-전류의 비선형성은 이상전압에 대한 선로 및 기기의 절연보호에 대해서는 매우 이상적이라고 할 수 있지만 직렬 갭이 없으므로 계통운전전압이 직접 산화아연 소자에 인가되어 상시 미소한 누설전류가 흐르게 된다. 따라서 뇌서지가 침입한 산화아연 소자는 상용 주파수 전압에서 미소 누설전류에 의해 차츰 열화가 진행된다[1-2]. 또한 ZnO 피뢰기는 외부 환경에 노출되어 있고 산화아연 소자는 저전계영역에서 온도의 변화에 민감하기 때문에 외부온도에 의한 영향과 강우에 의한 영향을 크게 받게 된다[1-3]. 특히 우리나라는 4계절이 뚜렷하고 계절마다 온도 변화가 크며, 강우량이 여름에 집중되기 때문에 외부 환경이 배전용 피뢰기에 미치는 영향을 고려해야 한다. 오랜 사용으로 자연적 또는 인위적 열화로 인해 산화아연 소자의 저항성 누설전류가 증가하게 되면 산화아연 소자의 발열량이 증가하고 고장을 일으킬 수 있는 열적 불안정상태에 도달하고 결국에는 열과피되어 보호장치로의 역할을 충분히 하지 못하고 사고를 유발시키게 된다[1-4].

따라서 본 논문에서는 산화아연 피뢰기에 흐르는 누설전류를 바탕으로 외부환경 변화가 배전용 피뢰기에 미치는 영향을 분석하기 위해 8/20[μ s], 2.5[kA]의 뇌임펄스전류를 75회 인가하여 인위적으로 열화시킨 배전용 피뢰기와 신품 배전용 피뢰기에 대하여 외부온도 변화 및 주수상태에서 상용주파수 교류 전압을 인가할 때 흐르는 누설전류를 측정하여 전기적 특성을 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에서 사용된 ZnO 배전용 피뢰기의 사진 및 규격과 전기적 특성을 그림 1과 표 1에 각각 나타내었다. 환경조건의 설정이 가능한 고전압시험용기에 ZnO 피뢰기를 설치하여 실험을 실시하였다.

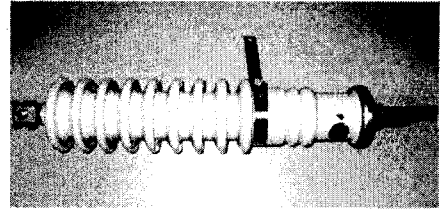


그림 1. ZnO 배전용 피뢰기의 사진
Fig. 1. Photography of ZnO surge arrester

표 1. 본 연구에 사용된 ZnO 피뢰기의 규격
Table 1. Specifications of the ZnO surge arrester used in this work

항 목	규격	
정격전압[kV]	18	
공칭방전전류[kA]	2.5	
최대 연속운전전압[kV]	15.3	
동작개시전압 [V1mA, kV]	AC	16.20
	DC	22.90
제한전압[8/20[μ s] kAcrest, [kV]]	65	
방전내량	단시간 대전류 [4/10[μ s] kAcrest]	25
	장시간 [μ s]	500
	소전류 Acrest	20

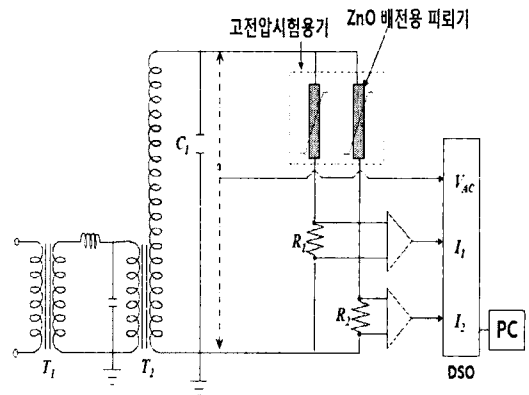


그림 2. ZnO 피뢰기의 전기적 특성의 평가를 위한 실험회로
Fig. 2. Experimental circuit for evaluating the electrical properties of ZnO surge arrester

외부 환경조건에 따른 ZnO 피뢰기의 전기적 특성의 변화

실험에 사용된 피뢰기는 산화아연소자로 이루어진 애자형 피뢰기이며, 정격전압과 공칭방전전류가 각각 18[kV], 2.5[kA]이고 22.9[kV] 정상 운전조건에서 ZnO 배전용 피뢰기에 인가되는 최대 연속운전전압은 15.3[kV]이다.

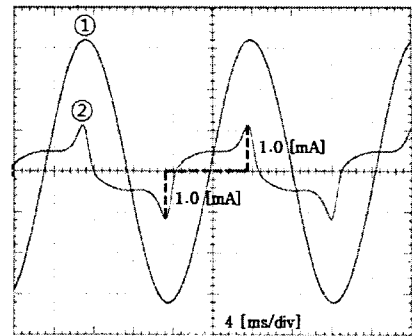
그림 2는 최대 50[kV]를 발생시킬 수 있는 교류 고전압발생장치의 회로도이다. 측정장비로는 디지털 오실로스코프(BW 500[MHz], 5[Gs/s] 4채널), 수동성 고전압 프로브(BW 75[MHz], 감쇠율 1000[X], 최대입력 직류전압 20[kV]), 능동성 FET 프로브(BW 500[MHz], 감쇠율 1/10, 최대 전압 ± 15 [V])를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

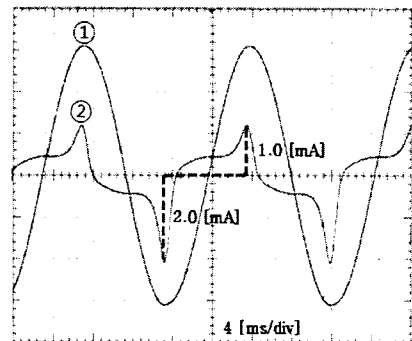
3.1 뇌임펄스전류에 의한 피뢰기의 열화

가공송전선이나 배전선에 침입한 낙뢰에 의한 뇌격전류가 전력설비에 미치는 영향의 파악에는 8/20 [μ s] 파형의 표준 뇌임펄스전류를 사용하고 있다. 뇌임펄스전류에 의한 ZnO 피뢰기의 성능저하 특성은 상용주파수 교류과전압에 의한 열화기구와는 다르다. 뇌임펄스전류는 ZnO 피뢰기 내부 소자의 비선형 저항특성을 저하시켜 보호성능에 큰 영향을 준다. 이것은 뇌임펄스전류의 경우 상용주파수 교류과전압에 비해 ZnO 피뢰기 소자의 입계층에 가해지는 전계의 세기가 정상상태보다 대단히 크므로 일반적인 소자의 동작 시 보다 많은 열이 발생하고 이 때문에 입계층의 변형이 쉽게 일어나기 때문이다. 만약 ZnO 피뢰기 소자가 불균일한 구조적 결함을 포함하고 있다면, 그 부분에 열이 집중되고 이로 인해 ZnO 피뢰기 소자의 열화는 더욱 가속된다. 이와 같은 과정에서 ZnO 입자가 성장하고 입계층이 감소하면 피뢰기 소자는 정상운전전압에서도 쉽게 가열되어 열폭주를 일으키게 되고 결국 피뢰기 소자는 파괴된다.

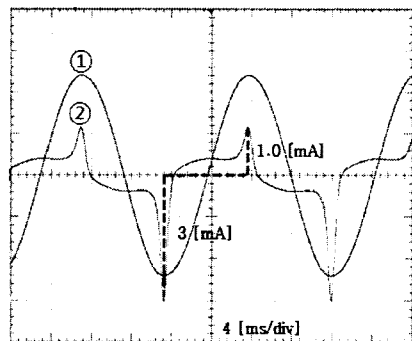
본 연구에서는 배전계통에 설치된 피뢰기에 낙뢰가 입사된 경우 피뢰기 성능의 저하를 모의하기 위해서 8/20 [μ s] 뇌임펄스전류의 인가횟수가 ZnO 피뢰기의 성능에 미치는 영향의 평가를 목적으로 IEC 규격의 임펄스전류시험에 규정된 ZnO 배전용 피뢰



(a) 신품 피뢰기



(b) 45회 인가 피뢰기



(c) 75회 인가 피뢰기

그림 3. 8/20 [μ s], 2.5[kA] 뇌임펄스전류의 인가횟수에 따른 ZnO 피뢰기의 누설전류 파형(① 전압파형, ② 전류파형)

Fig. 3. Waveforms of leakage current of ZnO surge arrester as a function of the number of injections of 8/20 [μ s], 2.5[kA] impulse current(① voltage waveform, ② current waveform)

기에 40초 간격으로 2.5[kA], 8/20[μ s]의 임펄스전류 75회까지 5×15개의 군단위로 인가하였다. 뇌임펄스전류를 인가시키기 전의 신품 ZnO 배전용 피뢰기와 45회, 75회의 뇌임펄스전류를 인가한 ZnO 피뢰기에 교류전압을 인가한 경우 피뢰기 양단에 나타나는 전압과 피뢰기를 통해 흐르는 누설전류 파형을 그림 3에 나타내었다. 그림 3 (a)에서 신품 ZnO 피뢰기의 누설전류 파형은 정·부극성이 대칭으로 나타나지만 뇌임펄스전류의 인가횟수가 증가하는 그림 3 (b), (c)로 갈수록 누설전류 파형에서는 정극성은 변화가 없지만 부극성 부분이 커져 정·부극성의 비대칭성이 커지는 것으로 나타났다. 이처럼 한 극성의 뇌임펄스전류에 대한 I-V 특성이 서로 다른 변화를 보이는 것은 입계층의 경계면에서 각각의 쇼트키장벽이 독립적으로 변형되기 때문이다. 즉, 뇌임펄스전류가 흐르는 동안 순바이어스와 역바이어스의 쇼트키장벽의 높이가 변형된 것으로 보인다.

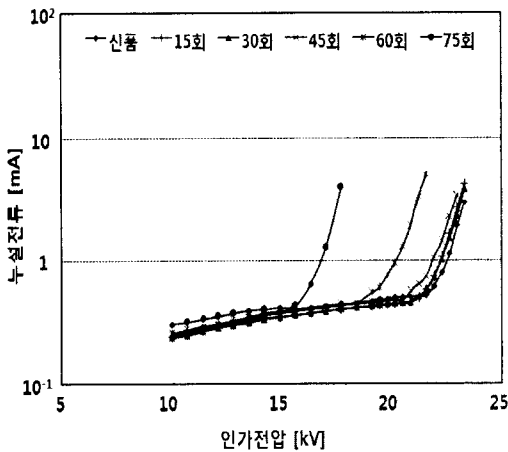


그림 4. 8/20[μ s], 2.5[kA] 뇌임펄스전류 인가횟수에 따른 ZnO 피뢰기의 I-V 곡선
 Fig. 4. I-V curve of ZnO surge arrester as a function of the number of injections of 8/20[μ s], 2.5[kA] impulse current

특히 역바이어스된 쇼트키장벽 근처에서 산소 양의 감소는 순바이어스된 쇼트키장벽보다 잘 일어나므로 역방향으로의 장벽 높이 변형이 순방향보다 더 잘 일어나고, 역방향으로 흐르는 누설전류는 순방향으로 흐르는 누설전류 값보다 많게 된다[5]. 뇌임펄

스전류의 인가횟수에 따른 열화의 진전은 누설전류의 극성에 따라 비대칭적으로 일어나게 되므로 누설전류에 피뢰기의 의한 열화진단시스템의 구축 시에는 반드시 극성에 대한 영향을 고려하여야 한다 [5-6].

신품 ZnO 피뢰기와 8/20[μ s], 2.5[kA] 뇌임펄스전류를 인가하여 열화시킨 ZnO 피뢰기의 I-V 특성을 그림 4에 나타내었다. 인가전압이 높아짐 따라 신품 ZnO 피뢰기에 비해 뇌임펄스전류에 의해 열화된 ZnO 피뢰기의 누설전류가 급격히 증가하였으며 인가횟수가 늘어날수록 더 낮은 인가전압에서 저항성 누설전류가 증가하였다.

3.2 피뢰기의 전기적 특성의 외부 온도 의존성

ZnO 피뢰기는 저전계영역에서 온도변화에 민감하게 반응하며 주위온도의 증가에 의해서 ZnO 피뢰기에 흐르는 누설전류가 증가한다. 즉, 온도상승에 의해서 ZnO 소자에 흐르는 누설전류가 증가하고 증가된 누설전류에 의해서 발열량이 증가되어 온도가 더욱 상승한다. ZnO 피뢰기는 외부에 노출되어 있기 때문에 외부 온도에 의한 영향과 태양의 복사열에

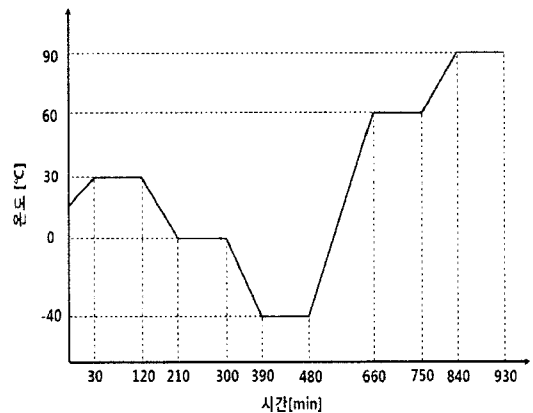
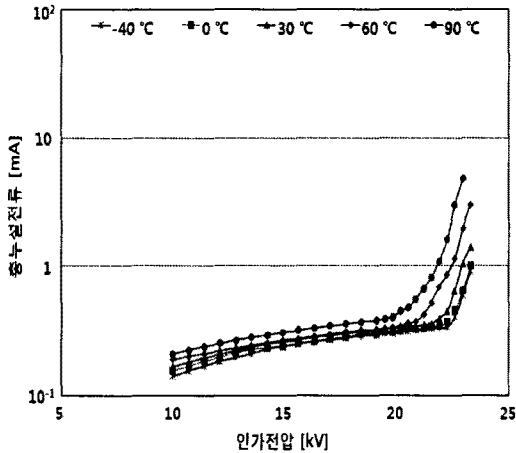


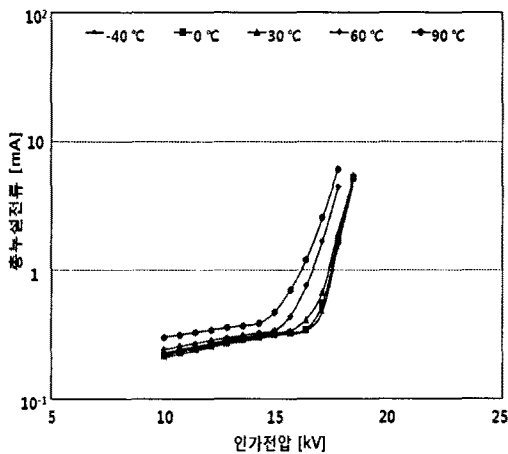
그림 5. ZnO 피뢰기 전기적 특성의 외부 온도 의존성 평가에 적용한 온도주기
 Fig. 5. Temperature period applied in evaluating the external temperature dependence of electrical properties of ZnO surge arrester

외부 환경조건에 따른 ZnO 피뢰기의 전기적 특성의 변화

의한 영향을 직접적으로 받아 외부 요인에 의해서 온도가 상승한다. 따라서 ZnO 피뢰기의 열화 정도와 수명을 평가하기 위해서는 계절적인 온도변화의 영향을 고려해야 한다[7-8].



(a) 신품 ZnO 배전용 피뢰기



(b) 열화된 ZnO 피뢰기

그림 6. 온도변화에 따른 ZnO 피뢰기의 I-V 특성
Fig. 6. I-V characteristics of ZnO surge arrester according to the temperature variation

ZnO 피뢰기의 용량성 전류는 전압레벨에만 관련되고 온도상승에는 저항성 누설전류가 주로 관련되기 때문에 동작개시전압 이전 영역에서의 저항성 누설전류의 온도의존성에 대한 평가가 필요하다. 본

연구에서는 온도를 $-40\sim 120[^\circ\text{C}]$ 까지 습도를 $20\sim 90[\%RH]$ 까지 조절할 수 있는 고전압시험용기를 사용하여 외부온도의 변화를 주었으며, 외부 온도의 변동 주기는 그림 5와 같이 한 주기가 930분(15시간 30분)이고, $-40\sim 90[^\circ\text{C}]$ 까지의 온도변화를 가진다.

그림 6은 $-40\sim 90[^\circ\text{C}]$ 의 온도에서 60 Hz 교류 전압을 인가하였을 때 신품 ZnO 피뢰기와 열화된 ZnO 피뢰기의 누설전류 변화를 나타낸다. 두 시료 피뢰기의 누설전류 변화 패턴은 거의 비슷하였으며, 저전계 영역과 중전계 영역의 누설전류의 변동양상이 열화된 피뢰기의 경우 낮은 인가전압에서 나타났다.

일반적으로 n형 반도체인 ZnO 피뢰기 소자의 부(-)온도 특성에 의해 온도가 상승하면 저항성 누설전류가 증가하며 발열량이 증가한다. 만약 외부 온도가 낮아 ZnO 피뢰기에서 발생하는 발열량이 열방산과 평형을 이루거나 발열량이 작다면 ZnO 배전용 피뢰기 소자의 온도를 상승시키지 않고 일정하게 유지되어 저항성 누설전류는 안정적으로 흐른다. 그러나 외부 온도가 높아져서 발열량이 방산열보다 많아지면 ZnO 피뢰기는 점점 온도가 상승하여 온도한계를 초과하게 되며 저항성 누설전류의 큰 증가와 함께 열폭주 상태에 도달하게 된다[8]. 본 연구 범위에서는 주위온도에 따른 열폭주와 같은 현상은 나타나지 않았다. 특히 뇌임펄스전류에 의해 열화된 ZnO 피뢰기의 경우에는 신품 ZnO 피뢰기보다 동일한 주위온도에서도 낮은 인가전압에서 저항성 누설전류가 크게 증가하는 것으로 나타났다.

3.3 주수상태의 전기적 특성

건조 상태에서 ZnO 피뢰기에 흐르는 누설전류의 대부분은 피뢰기 내부의 ZnO 소자로 흐르고 외피로 흐르는 누설전류의 양은 미세하지만 강우 시에 ZnO 피뢰기에 흐르는 누설전류는 건조 상태와 크게 다르다. ZnO 피뢰기는 외부로 노출되어 있어 강우에 의한 영향을 직접적으로 받으며 특히 우리나라의 연강수량은 약 $1,000\sim 1,850[\text{mm}]$ 이며 계절적으로 연강수량의 $50\sim 60[\%]$ 가 여름에 집중되어 있기 때문에 강우가 ZnO 피뢰기에 미치는 영향을 평가할 필요가 있다.

따라서 ZnO 피뢰기의 강우 시의 전기적 특성을 알아보기 위하여 KS C IEC 60060-1 고전압 시험 방법의 주수 교류 전압 시험규격에 따라 수직 성분의 평균 주수율을 5[mm/min]하고 주위온도는 15[°C]로 유지하였다[9]. 교류 전압을 인가하여 주수 시에 ZnO 배전용 피뢰기에 흐르는 외피와 내부의 누설전류를 측정하였다. ZnO 피뢰기에 흐르는 내부 누설전류와 외부 누설전류의 파형의 대표적인 예를 그림 7에 나타내었다.

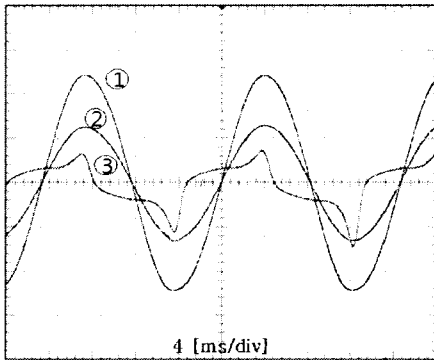
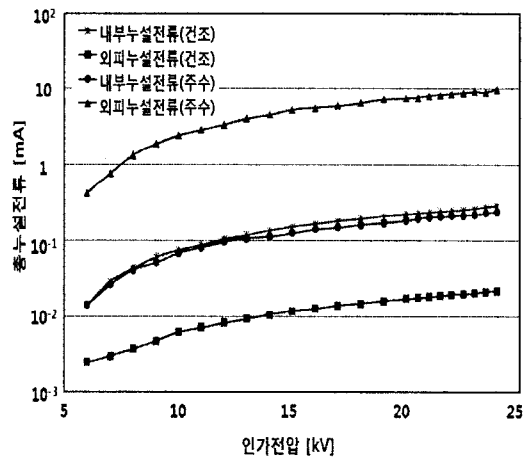


그림 7. 주수상태에서 ZnO 피뢰기의 누설전류 파형
 [① 인가전압, ②외부 누설전류, ③내부 누설전류]
 Fig. 7. Waveforms of leakage currents flowing through ZnO surge arrester under wet test(① Applied voltage, ② Extrinsic leakage current ③ Intrinsic leakage current)

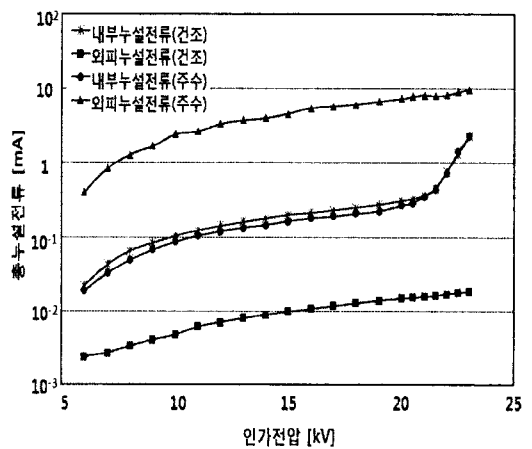
주수시에 피뢰기의 외피를 통하여 흐르는 누설전류는 인가전압과 동위상이며, 내부 누설전류는 ZnO 소자의 정전용량에 의한 용량성 전류와 저항성 누설전류의 합으로 나타난다. 따라서 주수시에 피뢰기에 흐르는 누설전류를 내부 누설전류와 외부 누설전류를 구별하지 않고 전체 누설전류를 측정하면 피뢰기 외피에 흐르는 전류가 저항성 누설전류와 합성으로 되므로 이의 영향을 최소화하는 적절한 방법의 적용에 대한 검토가 필요하다.

신품 ZnO 피뢰기와 열화된 ZnO 피뢰기의 외피와 내부에 흐르는 누설전류를 그림 8에 나타내었다. 건조 시에 신품 ZnO 피뢰기에 흐르는 누설전류는 피뢰기 내부에 흐르는 누설전류가 대부분으로 외피로 흐르는 누설전류는 매우 작게 검출되었다. 그러나

건조 시에 비하여 주수 시에 ZnO 피뢰기 외부로 흐르는 누설전류는 크게 증가하였고 주수 시에 내부로 흐르는 누설전류는 건조 시에 비해서 거의 변화가 없었다. 열화된 배전용 피뢰기도 신품 피뢰기와 유사하게 주수 시에 외피 누설전류가 크게 증가하였으며 내부 누설전류는 거의 변하지 않았다. 또한 주수 시 신품 ZnO 피뢰기와 열화된 ZnO 피뢰기의 외피 누설전류는 거의 동일하였다.



(a) 신품 ZnO 피뢰기



(b) 열화된 ZnO 피뢰기

그림 8. 주수상태에서 ZnO 피뢰기의 누설전류
 Fig. 8. Leakage currents of ZnO surge arrester under wet test

외부 환경조건에 따른 ZnO 피뢰기의 전기적 특성의 변화

이것은 강우 상태에서 ZnO 피뢰기에 흐르는 누설 전류는 대부분이 외피로 흐르는 누설전류이며 애자의 외피가 파손되지 않으면 건조 시와 다르게 열화 정도에 상관없이 일정한 누설전류가 외피를 통하여 흐른다고 판단된다.

주수 시에 피뢰기에 흐르는 누설전류의 대부분은 외피를 통하여 흐르기 때문에 상용주파수 누설전류를 검출하는 피뢰기의 열화진단시스템에서는 이와 같은 현상을 반드시 반영하여야 정확도를 향상시킬 수 있다.

4. 결 론

피뢰기에 뇌서지전류 침입의 모사를 비롯하여 외부 온도의 변화 및 주수 상태에 따른 특성의 분석을 위한 실험을 통해 ZnO 피뢰기에 흐르는 누설전류의 측정과 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 뇌임펄스전류에 의해 열화된 ZnO 피뢰기는 신폴 피뢰기에 비하여 교류 전압에 대하여 누설전류가 비대칭성으로 나타났다. 또한 뇌임펄스전류의 인가횟수가 증가함에 따라 비대칭성이 더욱 커졌다. 따라서 배전용 피뢰기의 누설전류를 이용하여 열화진단시에 극성에 대한 영향을 고려하여야 한다.

(2) 뇌임펄스전류의 인가횟수가 증가함에 따라 더 낮은 인가전압에서 저항성 누설전류 성분이 크게 되므로 ZnO 피뢰기의 외부 온도에 의한 영향도 열화된 피뢰기에서 크게 나타났다.

(3) 주수 시에는 ZnO 피뢰기의 내부 누설전류보다 외피 누설전류가 더 많이 흐르며 내부 누설전류의 큰 변화는 없었다. 피뢰기 열화진단시스템에서 누설전류의 검출에 대한 강우 시 외피 누설전류의 영향을 고려할 필요가 있다.

References

[1] W. G. Carlson, Dr. T. K. Gupta and A. Sweetana, "A Procedure for Estimating the Lifetime of Gapless Metal Oxide Surge arresters for AC Application", IEEE Transactions on Power system, Vol. PWRD-1, No.2, pp67-74, 1986.
 [2] S. Tominaga, Y. Shibuya, Y. Fujiwara, M. Imataki, T.Nitta, "Stability and long term degradation of metal oxide surge arresters", IEEE Trans. Vol. PAS-99, No.4, pp.1548-1556, 1980.

[3] Jinbo Kuang, Jeffrey A. Bennett, Ram G. Bommakanti and Steven A. Boggs, "Temperature Distribution in a ZnO Arrester Subjected to Multiple Current Impulses", Conference Record of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 1996.
 [4] Kazuo Eda, "Destruction mechanism of ZnO varistors due to high currents", J. Appl. Phys, Vol.56, No.10, pp. 2948-2955, 1984.
 [5] P. L. Hower and T. K. Gupta, "A Barrier Model for ZnO Varistors", J. Appl. Phys, Vol.50, No.7, pp.4847-4855, 1979.
 [6] 이복희, 박건영, 강성만, "산화이온 피뢰기 소자와 전극 사이에 발생하는 방전광 현상", 조명설비학회논문지, Vol.19, No.3, pp.44-50, 2005.
 [7] M. Mizuno, M.Hayashi and K. Mitani, "Thermal stability and life of the gapless surge arrester", IEEE Trans. Vol. PAS-100, No. 5, 1981.
 [8] S. Nishiwaki, H. Kimura, T. Satoh, H. Mizoguchi, S. Yanabu, "Study of thermal runaway/equivalent prorated model of ZnO surge arrester", IEEE Trans. Vol. PAS-103, No. 2, 1984.
 [9] KS C IEC 60060-1, 고전압 시험방법 - 제1부; 정의 및 시험방법, pp.23-26, 2001.

◆ 저자소개 ◆

이승주 (李承柱)

1981년 4월 9일생. 2007년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.
 Tel : (032)860-7398, Fax : (032)863-5822
 E-mail : cloudwise@naver.com

이수봉 (李守俁)

1979년 4월 13일생. 2002년 2월 경남대 공대 전기공학과 졸업. 2004년 2월 인하대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사수료.
 Tel : (032)860-7398, Fax : (032)863-5822
 E-mail : lsbong1@naver.com

이복희 (李福熙)

1954년 6월 29일생 1980년 인하대 공대 전기공학과 졸업 1987년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988~1989년 동경대학 생산기술연구소 객원연구원. 1995년 호주 Queensland대학 방문교수. 1999년 Cincinnati대학 방문교수. 현재 인하대IT공대 전기공학부 교수.
 본 학회 부회장.
 Tel : (032)860-7398, Fax : (032)863-5822
 E-mail : bhlee@inha.ac.kr