

직류+60[Hz]교류 중첩전압에 대한 18[kV] ZnO 피뢰기의 전기적 특성

(Electrical Properties of 18[kV] ZnO Surge Arrester Stressed by the Mixed DC and 60[Hz] AC Voltages)

이수봉* · 이승주 · 이복희

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

요 약

이 논문은 직류+60[Hz] 교류 중첩전압에서 신제품과 노후된 18[kV] 산화아연 서지피뢰기의 누설전류와 전력손실에 대하여 기술하였다. 최대 50[kV]의 직류+60[Hz] 교류를 발생시킬 수 있는 중첩전압발생장치가 설계되고 제작되었다. 피뢰기의 I-V 특성곡선은 전압중첩률 K의 함수로 측정된다. DC와 AC 전압이 중첩된 I-V, R-V 특성곡선은 순수한 직류와 교류곡선 사이에 있고 저전류 영역에서 교차현상이 나타난다. 그 결과 중첩 전압에서 직류 성분의 증가는 ZnO 피뢰기의 전체 누설전류의 저항성분의 증가를 유발한다. 또한 같은 인가전압에서 피뢰기를 통해 흐르는 누설전류는 상용전원에서 장시간 스트레스 받은 피뢰기가 신제품 피뢰기에 비해서 높게 나타났다.

Abstract

This paper describes the characteristics of power loss and leakage currents flowing through new and used 18[kV] zinc oxide (ZnO) surge arrester under the mixed DC and AC voltages. The mixed DC and AC voltage generator of 50[kV] peak was designed and fabricated. The I-V curves of ZnO surge arrester were measured as a function of the voltage ratio K. The I-V curves under the mixed DC and AC voltages lay between the pure DC and AC characteristics, and the cross-over phenomenon in both I-V curves and R-V curves was observed at the low current region. As a result, the increase of DC component in the mixed voltages causes the increase of resistive component of total leakage current of ZnO surge arrester. Also, in the case of same applied voltage, the leakage current flowing through the used ZnO surge arrester was higher than that of the new ZnO surge arrester.

Key Words : ZnO surge arrester, Mixed voltage, Leakage current, Cross-over phenomenon

* 주저자 : 인하대학교 대학원 전기공학과 박사과정

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

E-mail : lsbong1@naver.com

접수일자 : 2007년 7월 9일

1차심사 : 2007년 7월 16일

심사완료 : 2007년 8월 16일

1. 서 론

송·배전 전력계통에서는 일반적으로 낙뢰나 스워칭 서지 등과 같은 이상전압에 대하여 전력기기의

보호 및 절연 레벨의 감소를 위해 기술적, 경제적으로 가장 효과적인 피뢰기를 사용하고 있다. 현재 피뢰기 내부에 사용되는 소자는 주로 산화아연(ZnO) 소자이며, 이것의 전압-전류 특성은 비선형성이 매우 급격히 변하는 것이다. 이런 급격하게 변하는 비선형성은 이상전압에 대한 선로 및 기기의 보호에 대해서는 매우 이상적이라고 할 수 있지만 그와 동시에 ZnO 피뢰기의 매우 복잡한 특성이 수반되기 때문에 피뢰기의 도전기구의 해석은 매우 어렵다 [1-2]. 특히, 직류 전압에 대한 피뢰기의 도전기구와 전기적 특성은 교류 전압의 경우와는 다르며, 전류 영(0)점이 없으므로 속류의 차단도 어렵다. 직류고전압 송전시스템(HVDC)에서는 직류와 교류 전압의 변환을 위해 반도체 소자를 이용한 컨버터를 사용한다. 이로 인해 발생하는 고조파 전압에 의해 계통에 직류 전압과 고조파전압이 중첩된 형태로 작용하게 되며, 보다 다양한 형태로 피뢰기에 작용한다. 특히 ZnO 피뢰기에 동작개시전압보다 낮은 직류전압이 인가된 경우 피뢰기에 흐르는 누설전류는 동일한 크기의 교류 전압이 인가된 경우에 비해서 매우 작으나 동작개시전압의 범위에서는 직류전압에 대한 피뢰기의 누설전류가 훨씬 크다[3-4].

따라서 본 논문에서는 피뢰기에 흐르는 누설전류를 바탕으로 피뢰기의 전기적 특성을 분석하기 위해 직류와 60[Hz] 교류를 중첩시킨 중첩전압(DC+AC)을 ZnO 서지피뢰기에 인가하여 중첩전압에 대한 누설전류를 측정하고, 누설전류-전압 특성을 분석하였다. 특히 전압-전류특성곡선상의 동작개시전압 부근에서 나타나는 교차현상에 대하여 검토하였다. 또한 이를 바탕으로 피뢰기의 저항과 전력손실의 변화를 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

실험에 사용한 피뢰기는 정격전압과 공칭 방전전류가 각각 18[kV], 2.5[kA]인 ZnO 서지피뢰기를 사용하였다. 중첩전압에 대한 신품피뢰기를 비롯하여 노화된 피뢰기의 특성을 살펴보기 위해 11년, 15년 상시 운전전압에서 스트레스를 받은 피뢰기에 대하여 실험하였다. 그림 1은 최대 50[kV]를 발생시킬 수

있는 중첩전압발생장치이며, 그림 2는 이 발생장치의 회로도이다. 그림 2의 상위부분에는 교류전압이 인가되고 하위부분에서는 다이오드와 콘덴서 C₂를 이용하여 직류전압이 인가되도록 구성하였다.

측정장비로는 디지털 오실로스코프(BW 1[MHz], 5[Gs/s] 4채널), 수동성 고전압 프로브(BW 75[MHz], 감쇠비 1000 : 1, 최대입력 DC 20[kV]), 능동성 FET 프로브(BW 1[MHz], 감쇠율 1/10, 최대전압 ±15[V])를 사용하였다.

본 실험에서는 직류와 교류전압을 중첩시켜서 피뢰기에 인가하여 실험을 수행하였으며, 직류와 교류전압의 중첩된 비율을 나타내는 전압중첩률 K를 나타내는 방법은 다음과 같다.

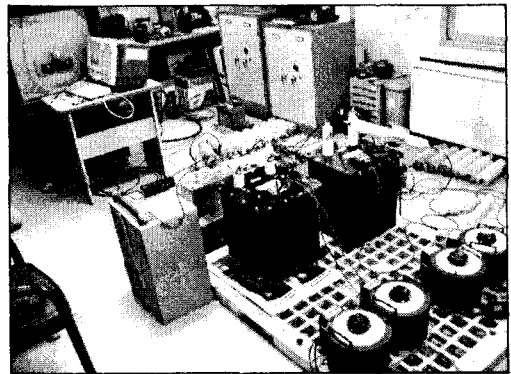


그림 1. 실험장치의 사진
Fig. 1. Photo. of experimental setup

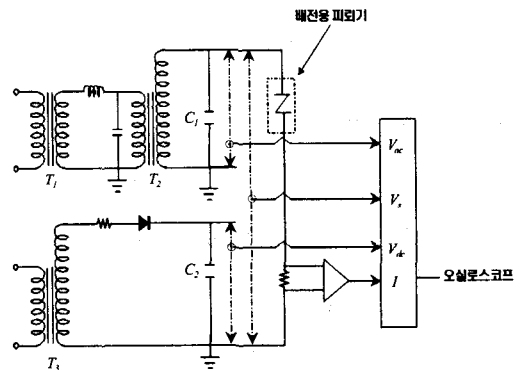


그림 2. ZnO 서지피뢰기의 전기적 특성의 평가를 위한 실험회로
Fig. 2. Experimental circuit for evaluating the electrical properties of ZnO surge arrester

직류+60[Hz]교류 중첩전압에 대한 18[kV] ZnO 피뢰기의 전기적 특성

$$K = \frac{V_{ac(peak)}}{V_{ac(peak)} + V_{dc}}$$

이 전압중첩률 K를 파라미터로 하여 인가전압에 의해 소자에 흐르는 누설전류를 나타내는 전압-전류 곡선을 작성하였고, 이에 대한 특성을 검토하였다[1, 3].

본 연구에서 사용된 ZnO 서지피뢰기의 규격과 전기적 특성은 표 1과 같다. 실험에 사용된 피뢰기는 산화아연소자로 이루어진 애자형 ZnO 서지피뢰기이며, 22.9[kV] 정상 운전조건에서 ZnO 서지피뢰기에 인가되는 최대연속운전전압은 15.3[kV]이다.

표 1. ZnO 서지피뢰기의 규격
Table 1. Specifications of the ZnO surge arrester

항 목		규 격	
정격전압([kV])		18	
공칭방전전류(kA)		2.5	
최대연속운전전압([kV])		15.3	
동작개시전압 (V_{1mA} , [kV])	AC	16.20	
	DC	22.90	
제한전압(8/20[μ s], 2.5[kA _{crest}], [kV])		65	
방전내량	단시간 대전류 (4/10[μ s] [kA _{crest}])	25	
	장시간 소전류	[μ s]	500
		A _{crest}	20

3. 결과 및 고찰

3.1. 중첩전압에 대한 누설전류 특성

중첩전압 발생장치를 이용하여 전압중첩률 K를 0에서 1까지 변화시키면서 20~32.2[kV_{peak}]의 전압을 ZnO 서지피뢰기에 인가하였다. 그림 3에 실험된 피뢰기와 11년, 15년 사용된 피뢰기를 일정한 중첩전압 28.2[kV_{peak}]에서 K의 변화에 따른 누설전류의 파형을 나타내었다.

실험된 피뢰기의 경우 28.2[kV_{peak}]는 동작개시전압 이전이기 때문에 용량성 누설전류가 저항성 누설전류보다 상대적으로 크게 나타났다. 하지만 전압중첩

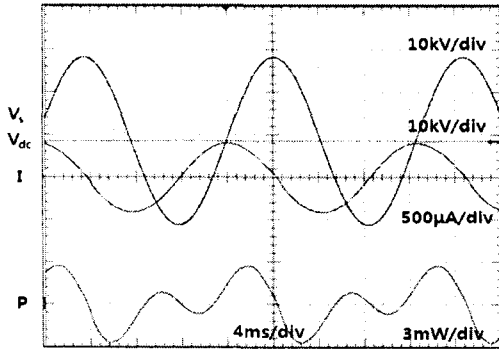
률 K가 감소함에 따라 용량성 누설전류가 감소하고 저항성 누설전류는 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 실험된 피뢰기와 11년, 15년 사용된 피뢰기를 비교해 보면 실험된 피뢰기보다 사용기간이 오래된 피뢰기일수록 동일한 전압, 동일한 전압중첩률에서 더 많은 저항성 누설전류가 흐르고 총 누설전류 값도 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 장시간 상시 운전전압에서 스트레스를 받은 피뢰기는 동작개시전압이 더 낮아지고, 성능이 저하 되었다고 판단할 수 있다. 모든 피뢰기의 동작개시전압 이상의 교류전압(전압중첩률 K=1)에 대한 누설전류는 용량성 전류가 저항성 전류보다 크게 나타났으며, 전압중첩률 K가 작아질수록 저항성 전류는 상대적으로 크게 증가함을 확인할 수 있다. 또한 이로 인해 총 누설전류의 크기도 역시 증가하였다.

3.2 누설전류-전압특성

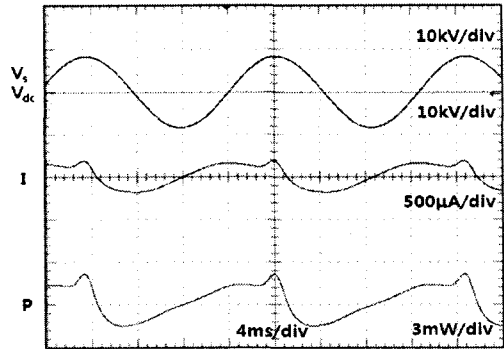
전압중첩률 K의 변화에 따른 실험된 ZnO 서지피뢰기와 11년, 15년 사용된 ZnO 서지피뢰기에 대한 누설전류-전압(I-V)특성곡선을 그림 4에 나타냈다. 전압중첩률 K의 변화에 따른 I-V곡선은 순수 직류 전압과 순수 교류 전압의 I-V곡선 사이에 나타났으며, 동작개시전압 부근에서 교차현상(Cross-over phenomenon)이 나타났다. 교차점을 기준으로 저전압에서는 동일한 전압중첩률 K에서 K가 감소할수록 누설전류의 피크치는 감소하였으나(그림 3의 a, b, c, d) 교차점 전압 이상의 영역에서는 동일한 크기의 중첩전압에서 전압중첩률 K가 감소할수록 누설전류는 증가하였다(그림 3의 e, f).

11년, 15년 사용된 ZnO 서지피뢰기의 경우에도 실험된 피뢰기의 경우와 마찬가지로 I-V 특성 곡선의 교차현상이 나타났으며, 노후된 피뢰기의 교차전압은 실험된 피뢰기에 비하여 낮게 나타났다. 그러나 동작개시전압 이하의 누설전류영역에서는 동일한 크기의 전압중첩에서 전압중첩률 K가 감소할수록 누설전류가 감소하고, 동작개시전압 이상의 영역에서는 누설전류가 증가하는 현상은 동일하게 나타났다.

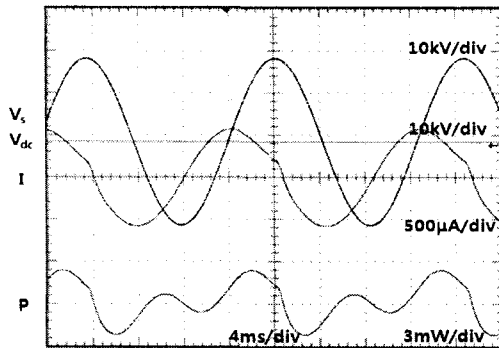
다만 동작개시전압 이하에서 누설전류가 감소하는 정도는 실험된 피뢰기에 비해 줄어들고 실험된 피뢰



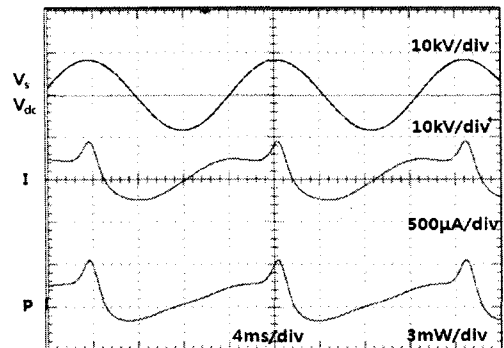
(a) $K=0.7$ (신품 피뢰기)



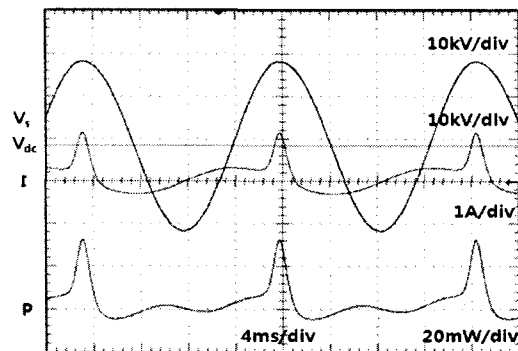
(b) $K=0.3$ (신품 피뢰기)



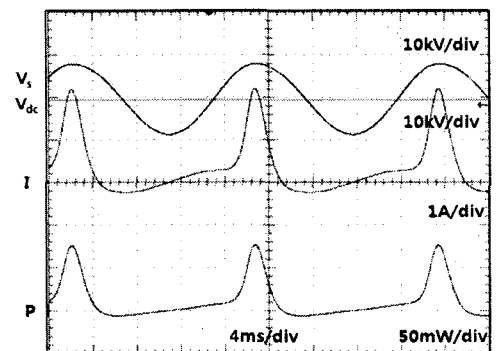
(c) $K=0.7$ (11년 사용된 피뢰기)



(d) $K=0.3$ (11년 사용된 피뢰기)



(e) $K=0.7$ (15년 사용된 피뢰기)



(f) $K=0.3$ (15년 사용된 피뢰기)

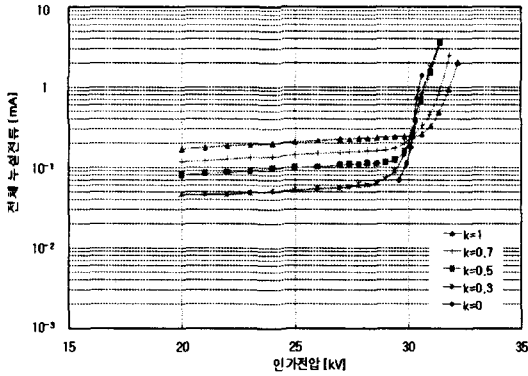
그림 3. ZnO 서지피뢰기의 전압중첩률 변화에 따른 누설전류의 파형

Fig. 3. Waveforms of leakage currents flowing through the ZnO surge arrester under the mixed DC+AC voltages as a function of voltage ratio

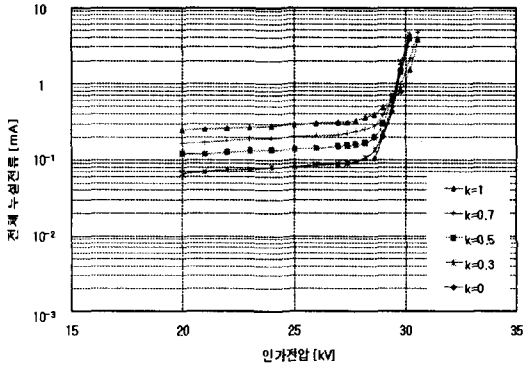
기에 비해 사용된 시간이 오래된 피뢰기가 I-V 특성 곡선의 비선형특성이 현저히 저하되었고, 총 누설전류는 크게 증가하였음을 확인하였다.

신품 피뢰기와 노후된 피뢰기의 I-V 특성곡선을 분석해 보면 교류 전압만이 인가될 때에 비해 전압중첩률 K가 감소할수록 신품 피뢰기보다 노후된 피

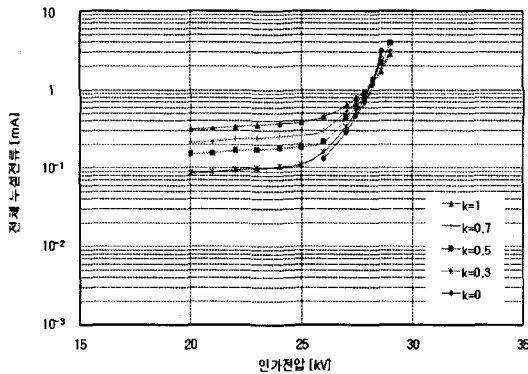
직류+60[Hz]교류 중첩전압에 대한 18[kV] ZnO 피뢰기의 전기적 특성



(a) 신품 피뢰기



(b) 11년 사용된 피뢰기



(c) 15년 사용된 피뢰기

그림 4. ZnO 서지피뢰기의 I-V 특성곡선
Fig. 4. I-V characteristic curves of the ZnO surge arrester

뢰기가 낮은 전압에서 누설전류가 증가하는 현상을 나타내었으며, 누설전류의 증가폭도 더 크게 나타났다. 신품 피뢰기와 노후된 피뢰기의 I-V 특성곡선에서 전압중첩률 K의 감소에 따른 누설전류의 증가는 주로 저항성 누설전류의 증가임을 감안한다면 전압중첩률의 감소, 즉 직류 전압 비율의 증가는 ZnO 서지피뢰기의 성능 저하를 가속시키는 요인으로 작용함을 알 수 있다. 특히 실제 운전상태에서 ZnO 서지피뢰기에 인가되는 전압이 피뢰기의 동작개시전압 이하인 점을 감안한다면 피뢰기의 열화진단에 있어 직류전압이 포함되는 전압중첩률에 대한 평가도 고려할 필요가 있다고 판단된다.

3.3 전기적 파라미터

3.3.1 등가저항

ZnO 서지피뢰기의 전기적 특성을 나타내는 등가회로는 저항과 커패시턴스로 표시된다. 커패시턴스가 단지 전압 등급에만 관련되고 피뢰기의 열화에는 크게 영향을 주지 않는 반면에 ZnO 서지피뢰기의 저항은 상용전압의 인가에 따른 피뢰기 소자의 온도 변화를 일으켜 피뢰기 열화에 중요한 인자로 작용한다[5]. 그림 5는 전압중첩률의 변화에 따른 신품 피뢰기와 11년, 15년 사용된 ZnO 서지피뢰기의 저항값의 변화를 나타내었다. 여기서 저항은 인가전압에 대한 저항성 누설전류의 비로서 계산하였다. R-V 특성곡선도 I-V 특성곡선과 같은 교차현상이 나타났으며, 사용기간이 오래된 피뢰기의 교차현상이 더 낮은 전압에서 나타났다. 이 곡선으로 오래 사용된 피뢰기의 저항이 더욱 작아지는 것을 알 수 있으며, 그로 인해 누설전류가 더 커진다고 판단할 수 있다.

동작개시전압 이전에서 저항은 순수 직류전압에서 교류전압보다 크게 측정되고 동작개시전압을 초과하면 반대로 된다. 이것은 I-V 특성곡선과 같이 교차점 전후로 저항의 특성이 바뀌는 것을 나타내며 동작개시전압 이후에 피뢰기의 저항은 교류전압보다 직류전압에 비례하여 작아지는 것을 나타낸다.

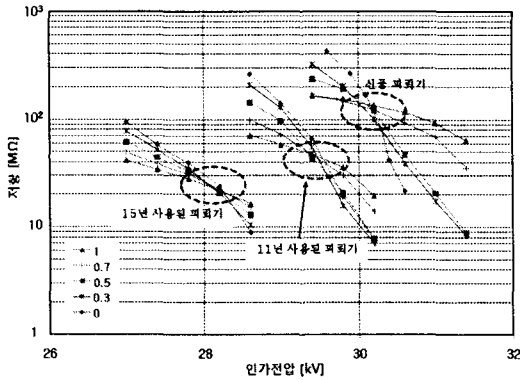


그림 5. ZnO 서지피뢰기의 R-V 특성곡선
Fig. 5. R-V characteristic curves of the ZnO surge arrester

3.3.2 전력손실

전력손실은 ZnO 서지피뢰기의 전기적 특성을 나타낼 수 있는 또 하나의 중요한 요소이다. 전력손실은 피뢰기의 온도 상승에 직접적인 영향을 미치며, 피뢰기의 전력손실이 커져서 피뢰기의 온도가 점점 증가하면 피뢰기의 열화가 가속되며 결국에는 열폭주 상태로 갈 수 있다[6].

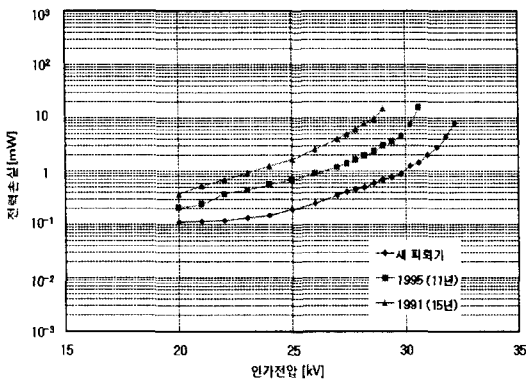


그림 6. ZnO 서지피뢰기의 전력손실-인가전압 곡선
Fig. 6. Power loss-applied voltage curves of the ZnO surge arresters

그림 6에 신품 피뢰기와 11년, 15년 사용된 ZnO 서지피뢰기의 전력손실을 나타내었다. ZnO 서지피뢰기의 전력손실은 저항성 누설전류에 의존하여 변하며 저항성 누설전류가 증가할수록 전력손실이 커진다. 따라서 동작개시전압을 초과하여 인가전압이

점점 높아지면 저항성 누설전류도 또한 커진다. 신품 피뢰기의 경우보다 노후된 피뢰기인 경우가 11년 사용된 피뢰기보다 15년 사용된 피뢰기가, 사용기간이 오래될수록 전력손실이 더 커졌다. 이것은 노후된 피뢰기일수록 저항값의 감소로 인한 동작개시전압이 감소하여 동일 인가전압에서 누설전류가 더 증가하기 때문이라고 판단된다. 따라서 상용주파전원에서 스트레스를 받은 기간에 따라서 피뢰기의 저항성 누설전류가 커지고, 전력손실이 점점 증가하여 동일한 전압에서 더욱 높은 온도 상승을 가져오기 때문에 피뢰기 성능의 열화가 점진적으로 진행되었다고 판단할 수 있다.

4. 결 론

직류와 교류가 중첩된 전압에 의해서 ZnO 서지피뢰기에 흐르는 누설전류의 측정과 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- ① 전압중첩률 K를 감소시킬수록 ZnO 서지피뢰기 누설전류의 용량성 성분은 감소하고 저항성 성분은 증가하였다.
- ② 중첩전압에 대한 ZnO 서지피뢰기의 I-V 특성 곡선에서 교차현상(Cross-over phenomenon)이 나타났으며, 사용된 기간이 길수록 ZnO 서지피뢰기의 I-V 특성 곡선의 교차점은 신품에 비해 낮은 인가전압에서 나타났으며 누설전류는 증가하였다.
- ③ ZnO 서지피뢰기의 사용기간이 오래될수록 I-V 특성곡선에서 비선형특성이 감소하는 것을 알 수 있다.
- ④ 피뢰기의 저항은 사용기간이 길고 인가전압이 높아질수록 작아지고 중첩전압률에 따라서 그 크기가 다르게 나타났다. 또한 R-V 특성 곡선에서도 교차현상이 나타났다.
- ⑤ 피뢰기의 전력손실은 사용기간이 길고 인가전압이 높을수록 전력손실은 증가하였다.

References

- [1] A. Haddad, H. S. B Elayan, D. M. German, and R.T. waters, "ZnO surge arrester elements with mixed direct and 50[Hz] voltages", IEC Proc., Pt. A, Vol.138, No.5, pp.265-272,1991.
- [2] A. Haddad, P. Naylor, Y. K. Tong and W. A. Marley, "Direct voltage and trapped charge effects on the protective characteristic of ZnO surge arresters", IEE Proc.-Sci. Meas. Technol., Vol 142. No.6, pp442-448, 1995.
- [3] B. H. Lee, S. B. Lee, D. M. Lee, D. C. Jung, S. M. Kang and C. H. Ahn, "Changes in Electrical Characteristics of ZnO Surge Arrester Blocks Subjected to Lightning Currents", Korea-Japan Joint Symposium on ED & HVE, pp 267-270, 2005.
- [4] B. H. Lee, Y. H. Baek, S. B. Lee, K. S. Lee, S. M. Kang, C. H. Ahn, P. U. Shim and K. S. Lee, "Electrical Properties of ZnO Elements under Combined DC and 60[Hz] AC Voltages", The 3rd Asian lightning Protection Forum, pp 100-105, 2005.10.
- [5] A. Haddad, J. Fuentes-Rosado, D. M. German, R. T. Waters, "Characterisation of ZnO surge arrester elements with direct and power frequency voltages", IEE Proc. Vol.137, Pt. A, No.5, pp.269-279, 1990.
- [6] M. Mizuno, M.Hayashi and K. Mitani, "Thermal stability and life of the gapless surge arrester", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 5, 1981.
- [7] 이복희, "고전압대전류공학", 청문각, pp. 223-226, 2001.8.

◇ 저자소개 ◇

이수봉 (李守備)

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 : ls bong1@naver.com

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@hanmail.net

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 인하대공대 전자전기공학부 교수. 본 학회 부회장.
 Tel : (032) 860-7398
 Fax : (032) 863-5822,
 E-mail : bhlee@inha.ac.kr