

직류와 60 Hz 교류가 중첩된 전압에 대한 산화아연 피뢰기 소자의 누설전류 특성

論 文

54C-1-5

Characteristics of ZnO Arrester Blocks Leakage Currents under Mixed Direct and 60 Hz Alternating Voltages

李 福 熙[†] · 姜 成 萬^{*} · 朴 健 榮^{**}

(Bok-Hee Lee · Sung-Man Kang · Keon-Young Pak)

Abstract - This paper presents the characteristics of leakage currents flowing through Zinc Oxide(ZnO) surge arrester blocks under mixed direct and 60 Hz alternating voltages. A mixed voltage, in which an alternating voltage is superimposed upon a direct voltage, appears on the HVDC system network. The mixed direct and alternating voltage generator with a peak open-circuit of 10 kV was designed and fabricated. The leakage currents and V-I curves for the fine and used ZnO surge arrester blocks were measured as a function of the voltage ratio k , where the voltage ratio k is defined as the ratio of the peak of alternating voltage to the peak of the mixed voltages. The resistive component in the leakage current in the low conduction region is significantly increased with increasing the voltage ratio k . The V-I characteristic curves for the mixed voltages lies between the direct and alternating characteristics, and the cross-over phenomenon in the high conduction region was appeared.

Key Words : ZnO Surge Arrester Block, Mixed Voltage, Leakage Current, Cross-over Phenomenon, Surge Protection

1. 서 론

송·배전 전력계통에서는 일반적으로 낙뢰나 스위칭 서지 등과 같은 이상전압으로부터 전력기기를 보호하고 절연레벨의 저감을 위해 피뢰기가 사용되고 있다. 피뢰기 소자는 현재 주로 산화아연(이하 ZnO)소자를 사용하고 있는데, 이것은 전압-전류 특성의 비선형성이 매우 급격히 변하는 특성을 가지고 있다. 이런 변하는 비선형성은 과전압 보호에 대해서는 매우 이상적이라 할 수 있다. 특히, 직류 전압에 대한 피뢰기의 도전기구와 전기적 특성은 교류 전압의 경우와는 다르며, 전류 영(0)점이 없으므로 속류의 차단도 어렵다. 교류계통전압에서 발생하는 과전압은 어떠한 임의의 위상에서도 일어날 수 있으며, 이 때 그 형태는 교류 전압과 임펄스전압이 중첩된 형태가 된다. 이는 과전압이 발생한 부분만 국한했을 때, 교류에 직류 전압이 중첩된 형태와 유사하게 된다. 또한 직류 고전압(HVDC) 송전시스템에서는 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 용도로 피뢰기를 적용한다. 특히 ZnO 피뢰기 소자에 공칭동작개시전압보다 낮은 직류 전압이

인가된 경우 흐르는 누설전류는 동일한 크기의 교류 전압이 인가된 경우에 비하여 매우 작으나 공칭동작개시전압 정도의 범위에서는 직류 누설전류가 훨씬 크다. 이와 같이 직류와 교류 전압에 대한 ZnO 피뢰기 소자의 특성이 다르므로 직류 피뢰기와 교류 피뢰기를 구분하여 사용하고 있다.[1-5]

직류 전압과 교류 전압이 중첩되는 HVDC 계통에 적용되는 피뢰기의 성능과 특성에 대하여 심층적으로 연구할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 직류와 60 Hz 교류가 중첩된 전압($V_{dc}+V_{ac}$)에 대한 ZnO 피뢰기 소자의 전기적 특성을 파악할 목적으로 중첩 전압에 대한 누설전류를 측정하고 전압-전류 특성을 측정하였다. 특히 전압-전류특성 곡선상의 동작개시전압 부근에서 나타나는 교차현상에 대하여 검토하였다.

2. 실험계 구성 및 실험방법

직류와 60 Hz 교류의 중첩전압에 의한 산화아연 피뢰기 소자의 누설전류 특성을 분석하기 위해 정격전압이 3 kV인 정상 시료와 임펄스전류를 인가시킨 노후시료에 대해서 실험하였다. ZnO소자에 다중도가 5이고, 전류 크기가 10 kA인 다중 뇌임펄스전류를 100회 인가시켜 피뢰기의 노후를 모의하였다. 최대 전압 10 kV를 발생시킬 수 있는 직류와 교류가 중첩된 중첩전압발생장치의 회로도를 그림 1에 나타내었다.

그림 1의 회로에서 커패시터 C_1 에는 상용 주파수의 교류 전압이 인가되고, 커패시터 C_2 에는 직류 전압이 인가되도록 구성하였다. 전원측에서 침입하는 노이즈를 제거하기 위해서 변압기 T_1 와

[†] 교신저자, 正會員 : 仁荷大 電子電氣工學部 教授 · 工博

E-mail : bhlee@inha.ac.kr

^{*} 正會員 : 仁荷大 電子電氣工學部 博士後 研究員

^{**} 學生會員 : 仁荷大 電子電氣工學部 碩士課程

接受日字 : 2004年 7月 26日

最終完了 : 2004年 12月 13日

T_2 사이에는 저역통과필터를 사용하였다. 또한 커패시터 C_2 에 직류 전압이 인가되면 변압기 T_2 의 2차측 전위가 1차 권선과 2차 권선 사이의 표류정전용량에 의해 전도되어 변압기 1차 측의 기준전위를 상승시키게 되므로 전원선측으로부터의 과전압 이행을 방지하기 위해 변압기 1차 측을 접지하여 기준전위의 상승을 억제하였다.[6]

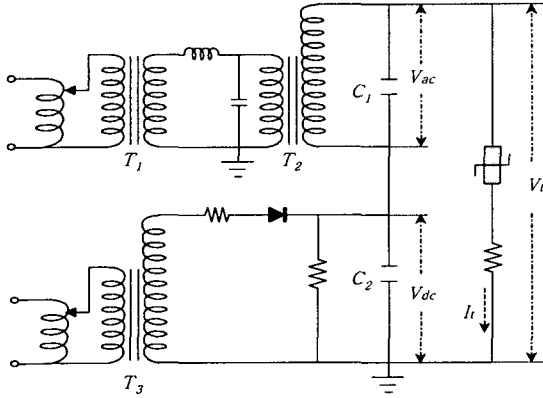


그림 1 직류와 교류중첩전압발생장치의 회로도.
 Fig. 1 Circuit diagram of the direct and 60Hz alternating mixed voltage generator.

식 (1)과 같이 직류 전압과 교류 전압이 중첩된 비율을 나타내는 전압중첩률 k 를 이용하여 실험하고자하는 비율에 따라 교류 전압을 인가한 후 직류 전압(V_{dc})을 중첩시켜 전체 중첩전압의 피크치를 측정하였으며, 그 때 흐르는 전체 누설전류의 파형과 피크치를 측정하였다. 전압중첩률 k 를 파라미터로 하여 인가전압의 피크치에 대한 누설전류를 나타내는 전압-전류곡선을 작성하고, 이에 대한 특성을 검토하였다.[1]

$$k = \frac{V_{ac(peak)}}{V_{ac(peak)} + V_{dc}} \quad (1)$$

본 연구에서 실증실험에 사용한 시료인 산화아연소자는 18 kV 상용 배전급 피뢰기로부터 채취하였으며, 이들의 규격과 전기적 특성은 표 1과 같다. 배전용 피뢰기(에관내에 산화아연소자 6개로 구성)로 사용되는 산화아연소자이며, 22.9[kV-y] 특고압 배전선로의 정상 운전조건에서 산화아연소자 1개에 인가되는 전압은 2.2 kV_{rms}이다.

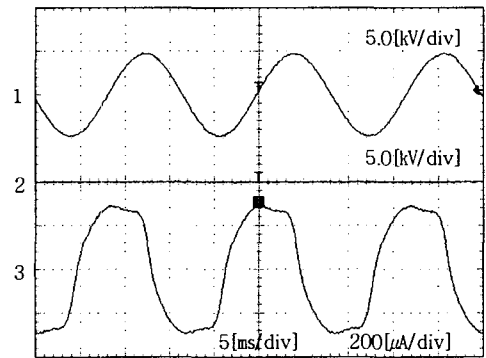
표 1. 산화아연소자의 규격과 전기적 특성
 Table 1. Specifications and electrical properties of the ZnO arrester blocks

항 목	규 격
직경	33 mm
두께	29 mm
정격전압	3 kV _{rms}
정격방전전류	2.5 kA _{crest}
최대연속 운전전압	2.55 kV _{rms}
공칭동작개시전압 (DC)	5.0 kV at 1 mA
제한전압	9.8 kV _{peak} at 5 kA

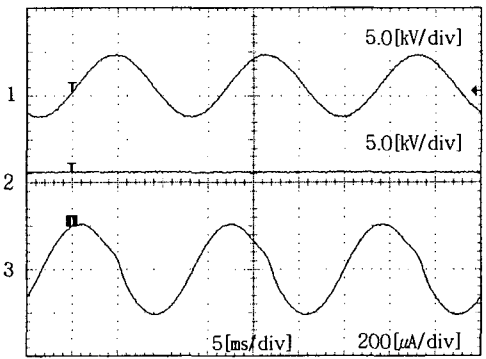
3. 결과 및 고찰

3.1 정상 시료의 전압-전류특성

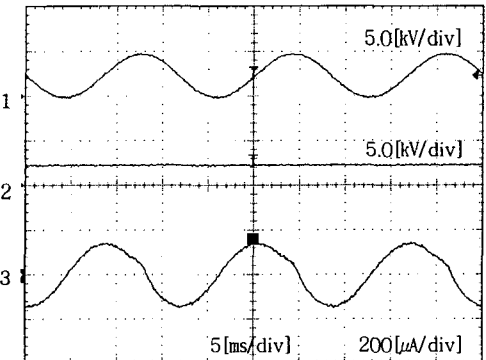
중첩전압발생장치를 이용하여 시험전압의 중첩률(k)을 0에서 1 까지 변화시키면서 중첩전압 1~5.4 kV사이에서 실험을 수행하였다. 피뢰기의 동작특성과 열화에 따른 성능변화를 알아보기 위해서는 ZnO 피뢰기 소자의 공칭동작개시전압 부근에서의 특성분석이 중요하므로 정상시료에 대해서는 공칭동작개시전압 ± 0.2 kV에서의 누설전류특성을 조사하였다. 정상인 ZnO소자의 동작개시전압 이하인 4.8 kV에서의 누설전류 파형과 동작개시전압보다 높은 5.2 kV에서의 누설전류 파형을 각각 그림2와 그림3에 나타내었다.



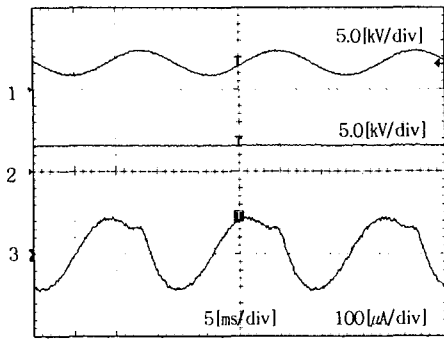
$k = 1.0$



$k = 0.7$



$k = 0.5$

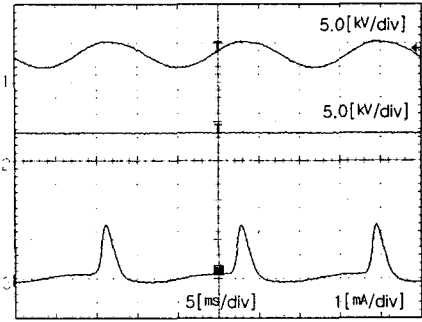


k = 0.3

1: 중첩전압 2: 직류전압 3: 누설전류

그림 2 피크전압 4.8 kV_{peak}에서 정상 ZnO 피뢰기 소자의 전압중첩률 변화에 따른 누설전류 파형.

Fig. 2 Waveforms of leakage currents flowing through the fine ZnO arrester block under the DC + AC mixed voltages of 4.8 kV_{peak} according to the voltage ratio.

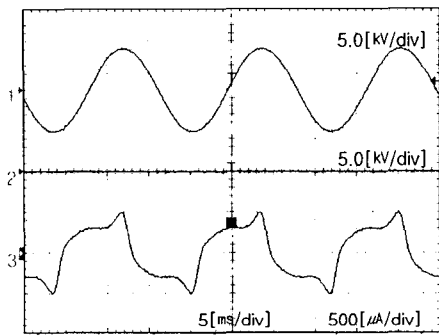


k = 0.3

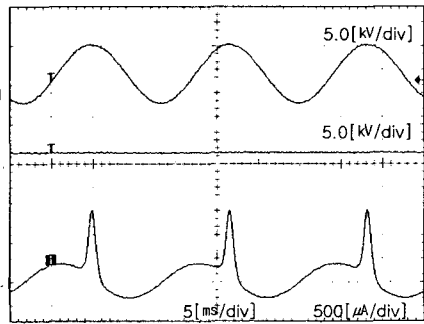
1: 중첩전압 2: 직류전압 3: 누설전류

그림 3 피크전압 5.2 kV_{peak}에서 정상 ZnO 피뢰기 소자의 전압중첩률 변화에 따른 누설전류 파형.

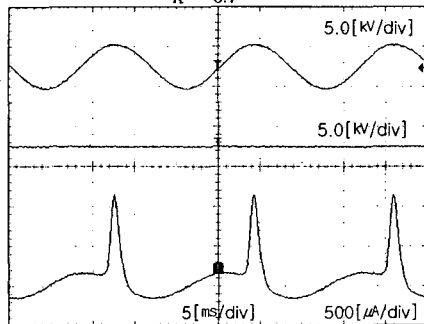
Fig. 3 Waveforms of leakage currents flowing through the fine ZnO arrester block under the DC + AC mixed voltages of 5.2 kV_{peak} according to the voltage ratio.



k = 1.0



k = 0.7



k = 0.5

중첩전압의 피크값을 일정하게 하고 전압중첩률 k의 변화에 따라 나타나는 누설전류의 특성을 살펴보면, 중첩전압이 공칭 동작개시전압 이하일 때의 누설전류는 k=1일 때는 저항성 전류보다 용량성 전류가 크게 나타났지만, k가 작아질수록 즉, 직류 성분이 증가할수록 용량성 전류의 크기가 작아졌고 총 누설전류도 감소했다. 또한 미소하지만 상대적으로 용량성 전류에 비해 저항성 전류가 증가함을 확인할 수 있었다. 시료의 공칭동작개시전압 이상의 전압에 대한 누설전류는 전압중첩률 k=1일 때 저항성 전류가 용량성 전류보다 크게 나타났으며, 전압중첩률 k가 작을수록 용량성 전류의 크기는 조금씩 감소하였으나 저항성 전류는 상대적으로 크게 증가함을 확인할 수 있었다. 또한 이로 인해 총 누설전류의 크기도 증가하였다.

정상 ZnO 피뢰기 소자에 대해서 전압중첩률 k의 변화에 따른 1~5.4 kV 사이에서 측정된 누설전류-중첩전압 특성 곡선을 그림 4에 나타내었으며, 이 그래프에 제시된 데이터는 측정된 값의 평균값이다.

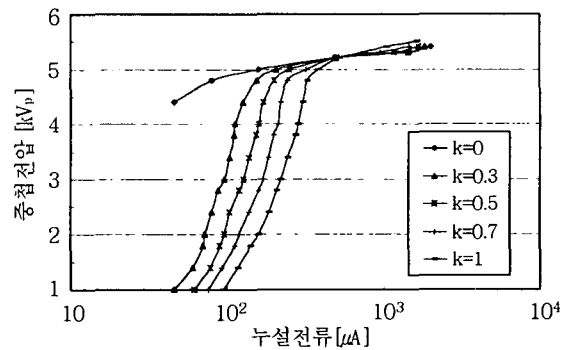


그림 4 중첩전압에 대한 정상 ZnO 피뢰기 소자의 I-V 곡선.

Fig. 4 I-V curves of the fine ZnO arrester blocks with the DC + AC mixed voltages as a parameter of the voltage ratio k.

전압중첩률 k 의 변화에 따른 I-V곡선은 직류 전압과 교류 전압에 대한 I-V곡선의 사이에 나타나고 공칭동작개시전압 부근에서 교차점을 가지는 교차현상(Cross-over phenomenon)이 나타내었다. 인가전압의 피크값이 약 5.2 kV에서의 교차점을 기준으로 볼 때 이 보다 낮은 전압에서는 동일한 중첩전압에서 k 가 감소할수록 누설전류의 피크치는 감소하였으나 교차점 전압 이상의 전도영역에서는 동일한 크기의 중첩전압에서 k 가 감소할수록 누설전류는 증가하였다.

이러한 현상은 그림 5에 나타난 바와 같은 ZnO 피뢰기 소자의 등가회로로부터 쉽게 이해할 수 있다. L 은 산화아연 피뢰기 소자 자체의 인덕턴스와 접속선에 의한 것으로 수 nH~수십 nH 정도이며, C 는 바리스터 양단의 정전용량, R_{leak} 와 R_{ideal} 은 누설전류영역과 비선형 영역에서의 전기저항이다.

이 등가회로에 직류와 교류가 중첩된 전압이 인가되면, 공칭동작개시전압 이하에서는 ZnO 피뢰기 소자는 이론적으로 무한대의 저항을 가지므로 인가된 전압이 대부분 커패시터에 걸리고 이에 따라 누설전류도 대부분 용량성을 나타내게 된다.

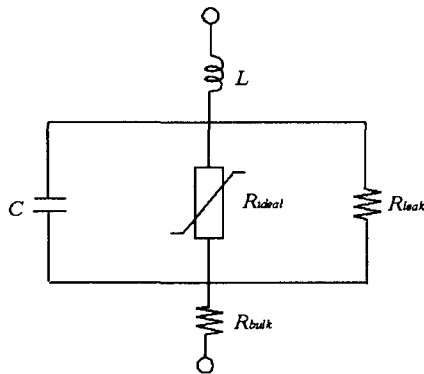


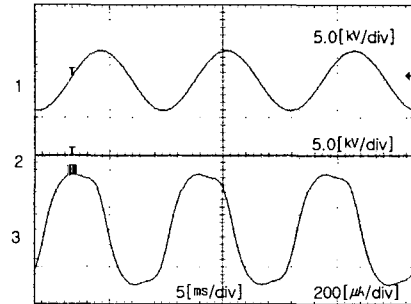
그림 5 산화아연 피뢰기 소자의 등가회로.
Fig. 5 Equivalent circuit of ZnO arrester block.

단, 전압중첩률 k 가 감소할수록 상대적으로 용량성 전류보다 저항성 전류가 증가하는 이유는 인가한 중첩전압 중 직류 전압 비율의 증가로 인해 교류 전압의 동상에서 나타나는 저항성 전류가 증대되는 효과인 것으로 판단된다. ZnO소자의 미세구조에서 입계층에 존재하는 정전용량의 영향보다 결정립에서의 저항의 영향이 크게 작용한 것으로 볼 수 있다. 하지만 산화아연 피뢰기 소자의 공칭동작개시전압 이상에서는 비선형계수의 급격한 증가로 인해 무한대의 값으로 작용하던 저항이 감소하게 되며, 이로 인해 커패시터로 흐르지 못하던 누설전류 중 직류 성분이 비선형 저항으로 흐르게 된다. 직류 성분의 증가는 곧 동상인 누설전류의 저항성의 증가를 의미하므로, ZnO 피뢰기 소자에 흐르는 누설전류는 용량성보다 저항성이 크게 증가하는 결과를 가져오게 된다.[7-8]

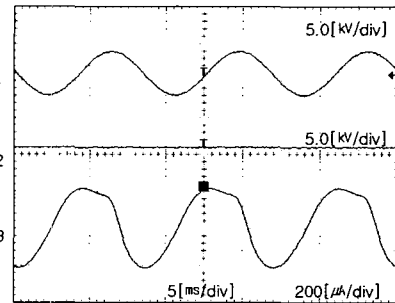
3.2 임펄스전류에 의해 노후 시료의 전압-전류 특성

다중 뇌격전류를 모의한 다중 뇌임펄스전류 발생장치를 이용하여 다중도 5인 8/20 μ s, 10 kA의 다중 임펄스전류를 100회

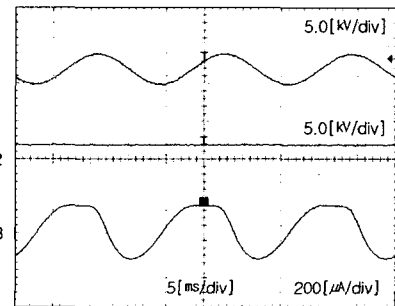
인가시켜 ZnO 피뢰기 소자를 강제 열화시킨 노후시료에 대해서 정상시료와 동일한 방법으로 중첩전압에 대한 누설전류 특성을 측정하였다. 피크전압 4 kV_{peak}의 누설전류 파형과 5 kV_{peak}에서의 누설전류 파형을 각각 그림 6과 그림 7에 나타내었다.



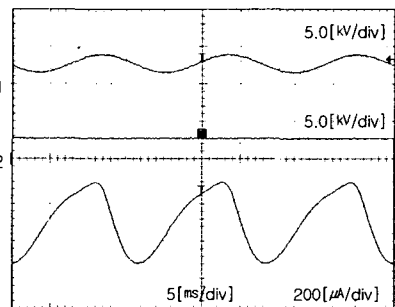
$k = 1.0$



$k = 0.7$



$k = 0.5$

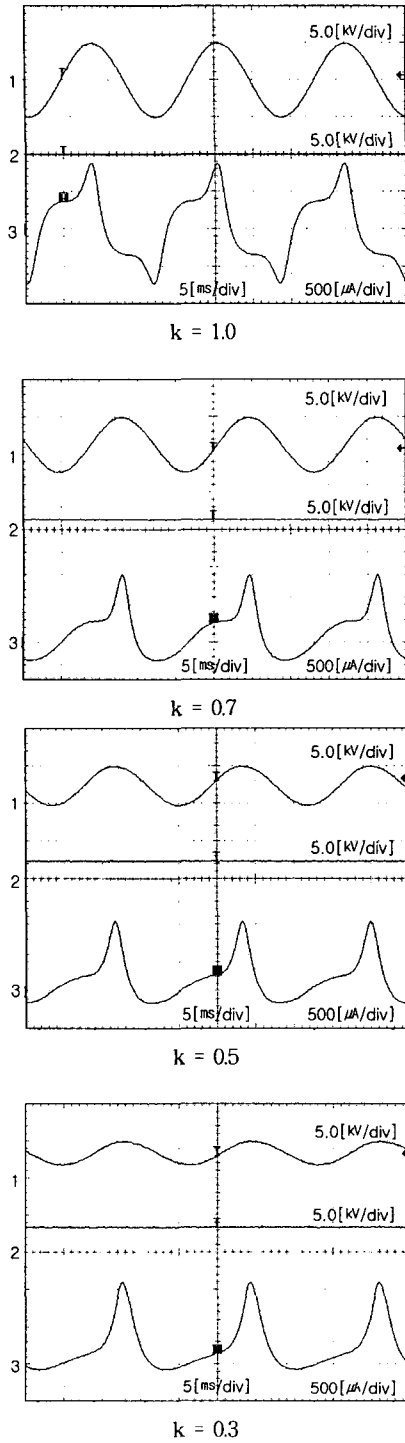


$k = 0.3$

1: 중첩전압 2: 직류전압 3: 누설전류

그림 6 피크전압 4 kV_{peak}에서 노후 ZnO 피뢰기 소자의 전압중첩률 변화에 따른 누설전류 파형.

Fig. 6 Waveforms of leakage currents flowing through the used ZnO arrester block under the DC + AC mixed voltages of 4 kV_{peak} according to the voltage ratio.



1: 중첩전압 2: 직류전압 3: 누설전류

그림 7 피크전압 5 kV_{peak}에서 노후 ZnO 피뢰기 소자의 전압중첩률 변화에 따른 누설전류 파형.

Fig. 7 Waveforms of leakage currents flowing through the used ZnO arrester block under the DC + AC mixed voltages of 5 kV_{peak} according to the voltage ratio.

정상시료인 경우와 마찬가지로 일정한 피크값의 중첩전압에서 전압중첩률 k의 변화에 따라 나타나는 누설전류의 특성을 살펴보면 k가 감소할수록 동작개시전압 이하에서는 누설전류

의 용량성이 감소하였고, 총 누설전류 또한 감소하는 경향을 나타내었다. 정상시료에 비해서 노후시료의 누설전류는 용량성 성분은 미소한 증가를 보이지만 저항성 성분은 눈에 띄게 증가한 것을 알 수 있다. 공칭동작개시전압 이상에서는 전압중첩률 k가 감소할수록 용량성 전류도 감소하였고 저항성 전류 및 총 누설전류는 증가하였다. 노후 ZnO 피뢰기 소자에 전압중첩률 k를 변화시켜 가면서 전압 1~5.4 kV 범위에서 측정된 I-V 특성곡선을 그림 8에 나타내었다.

다중 임펄스전류를 인가시킨 노후 ZnO 피뢰기 소자의 경우에도 정상시료의 경우와 마찬가지로 전압-전류특성곡선의 교차현상이 나타났으며, 노후시료의 교차점전압(약 4.8 kV)은 정상시료의 교차점전압(약 5.2 kV)에 비해 낮게 나타났다. 공칭동작개시전압 이하의 누설전류영역에서는 동일한 크기의 중첩전압에서 중첩률 k가 감소할수록 누설전류가 감소하고, 공칭동작개시전압 이상의 전도영역에서는 누설전류가 증가하였다. 다만 공칭동작개시전압 이하에서 누설전류가 감소하는 정도는 정상시료에 비해 줄어들었다. 또한 정상시료에 비해 I-V 곡선의 비선형계수가 상당히 감소하고 총 누설전류의 크기는 증가하였음을 확인하였다.

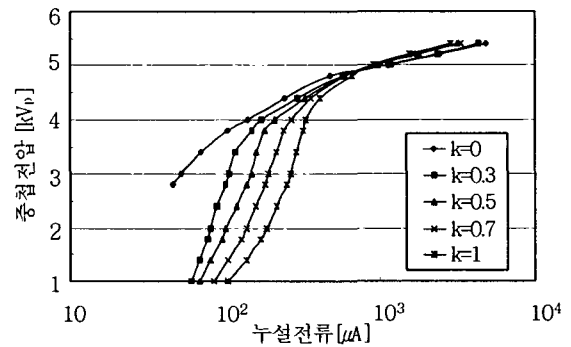


그림 8 중첩전압에 대한 노후 ZnO 피뢰기 소자의 I-V 곡선.
Fig. 8 I-V curves of the used ZnO arrester blocks under the DC + AC mixed voltages as a parameter of the voltage ratio k.

정상시료와 노후 ZnO 피뢰기 소자의 I-V곡선을 분석해 보면 전압중첩률 k가 감소함에 따라 그래프상의 교차점 통과 전·후로 누설전류의 피크치 특성이 바뀌는 것을 확인할 수 있다. 즉, 통과 전에는 전압중첩률 k가 감소할수록 즉, 직류 성분이 증가할수록 누설전류의 피크치는 감소하였으나 통과 후에는 누설전류 피크치가 약간 증가하였다. 이로부터 교차점은 ZnO 피뢰기 소자의 입계층 커패시터 용량을 결정하는데 의미가 있는 요소로 작용함을 유추해 볼 수 있다.

3.3 전압중첩율에 따른 ZnO 피뢰기 소자의 전압-전류 특성

중첩률이 ZnO 소자의 전기적 특성에 미치는 영향을 살펴보기 위해 그림 9와 같은 중첩전압에서의 누설전류 특성을 그래프로 나타내었다.

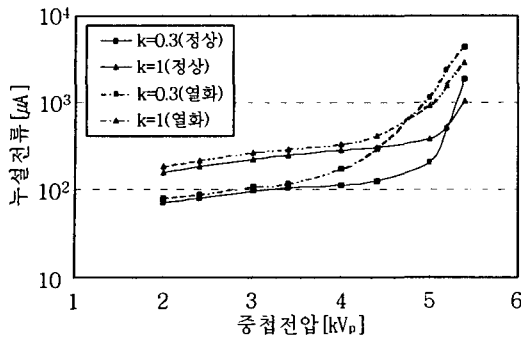


그림 9 직류와 교류가 중첩된 전압에 대한 누설전류의 특성 곡선.

Fig. 9 Characteristic curves of the leakage currents biased by the mixed direct and 60 Hz alternating voltages.

교류 전압만이 인가된 때(k=1)에 비해 전압중첩률 k가 감소할수록 정상 및 노후 시료 모두 총 누설전류의 피크치는 감소하였으나 정상시료보다는 노후시료에서 낮은 전압에서 누설전류가 증가하는 현상을 나타냈으며, 그의 증가폭도 더 크게 나타났다. 정상시료와 노후시료의 전압-전류특성에서 전압중첩률 k의 감소에 따른 누설전류의 증가는 주로 저항성 누설전류의 증가임을 감안한다면 전압중첩률의 감소 즉, 직류 전압 비율의 증가는 ZnO 피뢰기 소자의 성능 저하를 가속시킬 수 있는 요인으로 작용함을 알 수 있다. 특히, 실제의 운전상태에서 ZnO 피뢰기에 인가되는 전압이 피뢰기의 공칭동작개시전압 이하인 점을 감안한다면 피뢰기의 열화진단에 있어 전압중첩률에 대한 평가도 고려할 필요가 있다고 판단된다.

4. 결 론

직류와 교류가 중첩된 전압에 의해서 산화아연 피뢰기 소자에 흐르는 누설전류의 측정과 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 전압중첩률 k를 감소시키면 누설전류의 용량성성분은 감소하고 저항성성분은 증가하였다.
- (2) 중첩전압에 대한 ZnO 소자의 I-V곡선 상에서도 교차현상(Cross-over phenomenon)이 나타났으며, 직류와 교류 전압에 대한 노후시료의 I-V곡선의 교차점은 정상시료에 비해 전압은 낮고 누설전류가 증가한 위치에서 나타났다.
- (3) I-V 특성곡선상의 교차점이하의 범위에서는 동일한 크기의 피크전압에 대해서 직류전압의 비중이 높아짐에 따라 누설전류가 증가하였다.
- (4) 중첩전압의 경우 직류 성분이 ZnO 피뢰기의 성능을 가속적으로 저하시키는 요인임을 알았다.

감사의 글

이 논문은 산업자원부에서 시행하는 대학전력연구센터 육성지원사업에 의해 작성되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] Haddad, A.; Elayyan, H.S.B.; German, D.M.; Waters, R.T.; "ZnO surge arrester elements with mixed direct and 50 Hz voltages", Science, Measurement and Technology, IEE Proc., Vol.138, No.5, pp.265~272, 1991.
- [2] A. Haddad, J. Fuentes-Rosado, D.M. German and R.T. waters, "Characteristics of ZnO surge arrester elements with direct and power frequency voltages", IEE Proc, Vol.137, No.5, pp.269~279, 1990.
- [3] J. Lundquist, L. Stensrom and A. Schei, B. Hansen, "New method for measurement of resistive leakage currents of metal-oxide surge arrester in service", IEEE Trans., Vol.PD-5, No.4, pp.1811~1822, 1990.
- [4] Bok-Hee Lee, Sung-Man Kang, Ju-Hong Eom, Tatsuo Kawamura, "A Monitoring Device of Leakage Currents Flowing through ZnO Surge Arresters" Japanese Journal of Applied Physics, Vol.42, Pt.1, No.2A, pp.1568~1574, 2003.
- [5] 이복희, 강성만, "산화아연 피뢰기소자에 흐르는 저항분 누설전류의 검출기법", 한국조명·전기설비학회 논문지, Vol.15, No.3, pp.67~73, 2001.
- [6] 이복희, "고전압대전류공학", 청문각, pp.223~226, 2001.8
- [7] W. G. carlson, Dr. T. K. Gupta, A. Sweetana "A procedure for estimating the life time of gapless metal oxide surge arresters for AC application", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.PWRD-1, No.2, pp.67~74, 1986.
- [8] M. Oyama, I. Ohshima, M. Honda "Life performance of zinc-oxide elements under DC voltage", IEEE Trans., Vol.PAS-101, No.6, pp.1364~1368, 1982.

저 자 소 개



이 복 희 (李 福 熙)

1954년 6월 29일생. 1980년 2월 인하 대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1988~89년 동경 대학 생산기술연구소 객원연구원. 1995년 호주 Queensland대학 방문교수. 현재 인하대 공대 전자전기공학부 교수. 인하대학교 차세대고전압전력기술연구원 소장

Tel : (032) 860-7398

Fax : (032) 875-1276

E-mail : bhlee@inha.ac.kr



강성만 (姜成萬)

1973년 4월 6일생. 1998년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 2004년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 인하대 차세대고전압전력기술연구센터 박사후 연구원

Tel : (032) 860-7398

Fax : (032) 875-1276

E-mail : webmaster@smilepia.com



박건영 (朴健榮)

1975년 7월 23일생. 2003년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 2004년 현재 인하대 대학원 전기공학과 석사과정

Tel : (032) 860-7398

Fax : (032) 875-1276

E-mail : airkun@hanmail.net