

뇌충격전류에 의한 산화아연소자의 열화특성에 관한 연구

한 주 섭* · 길 경 석**

A Study on the Degradation Characteristics of ZnO Blocks by Lightning Impulse Current

Han Joo-Sup* · Kil Gyung-Suk**

Abstract

This thesis deals with the effect of impulse current on degradation of ZnO blocks used in lightning arrester of power systems.

Lightning arresters are the most economical and effective protection device against transient overvoltages on power systems. Nowadays, the type of lightning arresters using ZnO blocks, having excellent nonlinear characteristics, are by far the most widely used and their applications have considerably improved the reliability of power systems. However, the nonlinear characteristics of ZnO block is degraded showing increases in resistive leakage current by overtime impulse current, and the degraded ZnO block is brought to a thermal runaway and finally destroyed. It is therefore important to estimate the degradation of ZnO blocks by means of the characteristics of resistive leakage current against impulse current.

In this study, an impulse current generator which can produce 8/20 [μ s], 3 [kA] and 4/10 [μ s], 5 [kA] waveform is designed and fabricated to simulate the lightning impulse current of power systems. Total energy applied to the ZnO blocks at each time is 739 [J] in 8/20 [μ s] and 523 [J] in 4/10 [μ s] impulse current, respectively. The residual voltage, reference voltage, and leakage current components flowing to

* 한국해양대학교 전기공학과 석사과정 전기공학 전공

** 한국해양대학교 전기공학과 교수

the ZnO blocks are observed.

From the experimental results, the resistive leakage current increases continuously with the number of applied impulse current, but no significant changes in clamping voltage and in operating voltage are observed until the ZnO block is destroyed. Also, it is confirmed that the main factor on degradation of ZnO blocks is rather the total energy applied to ZnO blocks than the peak value of the impulse current.

1. 서 론

전력계통의 송·배전선로는 직격뢰와 유도뢰의 침입 또는 개폐기 동작에 의하여 정상 운전전압보다 최대 십 수배에 달하는 이상전압이 빈번하게 발생하여, 전력계통에 연결된 변압기, 차단기 등과 같은 중전기기의 절연을 위협하고 있다. 특히 뇌(雷)에 의해 발생하는 이상전압은 개폐기 동작에 의해 발생하는 것보다 전압의 크기와 에너지 량 면에서도 훨씬 크다. 이에 대한 대책으로 송·배전선로에는 뇌에 대한 이상전압 보호장치로 피뢰기(Lightning Arrester)를 기기 또는 선로에 병렬로 설치하고 있다.

피뢰기는 전력계통에 발생한 이상전압을 피보호기기의 절연전압 이하로 억제시킴으로써 기기를 안전하게 보호하는 역할을 담당하는 장치로, 현재는 전압-전류의 비선형 저항 특성이 우수한 산화아연(ZnO) 피뢰기가 주류를 이루고 있다.

ZnO 피뢰기 소자의 개발에 의해 전력계통에서 피뢰기의 보호능력이 현저히 향상됨으로써, 전력계통설비의 내절연전압과 전류충격강도를 경감시켜 기술적, 경제적으로 혁신을 이루었다. 그러나 특고압 배전선로와 같은 전력계통에서는 부하설비의 광범위한 분포로 피뢰기의 설치개수가 많아지고, 복잡한 연계로 인하여 이상전압의 발생빈도가 증가하므로 피뢰기의 보호동작이 많아지게 된다. 이상전압에 대한 피뢰기의 보호동작은 이상전압을 피뢰기 소자의 비선형 저항특성에 의해 낮은 전압으로 억제시키고, 이때 발생하는 방전전류는 대지로 방출시킨다.

이 과정에서 피뢰기는 많은 열화가 진전되며, 열화된 피뢰기가 전력계통에 계속 설치되어 있으면 상용전압에서의 과열 또는 그 후 계속되는 보호동작에서 피뢰기 폭발로 인하여 지락사고로 진전하여 2차적인 인적·물적 사고를 유발시킨다^[1].

배전선로의 급격한 증가와 피뢰기 설치개소의 증가에도 불구하고 절연재료와 중전기기의 성능 향상, 유지보수기술의 발전으로 전체 사고건수는 80년대 초기와 비교하면 많이 감소된 것을 알 수 있다. 그러나 전체 사고 중 피뢰기에 의한 사고는 매년 일정 수준 이상을 유지하고 있어 이에 대한 대책이 필요하다. 피뢰기 자체의 자연열화가 원

인이 되어 발생한 사고는 전체 피뢰기에 의한 사고 중에서 약 40% 정도로 나타났으며, 많은 사고가 피뢰기의 점진적인 열화로 발생함을 알 수 있다.

최근 이러한 배경에서 ZnO 피뢰기의 열화를 사전에 진단하고, 사고 유발 가능성이 있는 피뢰기를 배전계통에서 미리 제거함으로써 피뢰기에 의한 사고를 방지하여 전력공급의 신뢰성 향상에 관한 연구가 국·내외적으로 활발히 진행되고 있다^{[2][3]}.

따라서 본 연구에서는 ZnO 피뢰기의 열화판단 기준을 확립할 목적으로, 배전선로에 설치되어 있는 ZnO 피뢰기의 주된 열화 원인인 충격전류를 실험실내에서 발생시켜 인위적으로 열화를 진전시킬 수 있도록 하였다. 특고압 배전선로에서 발생하는 충격전류는 다양하기 때문에 실험적 평가를 위하여 ZnO 피뢰기에 대한 국내시험규격(ESB153)과 국제시험규격(IEC99 4, IEEE C62.11)을 적용하여 실험방법을 결정하였다.

본 연구에서 구성한 실험장치와 측정장치로부터 ZnO 피뢰기의 뇌충격전류에 의한 열화진전특성을 평가할 수 있었으며, 그 결과로부터 열화판단기준을 확립할 수 있을 것이다.

2. 실험장치 및 실험방법

배전용 피뢰기에 사용되는 ZnO 소자의 뇌충격전류에 의한 특성변화를 파악하고 피뢰기의 열화기준을 제시하기 위해서는 정상운전조건과 뇌충격전류의 인가에 따른 소자의 누설전류, 제한전압, 동작개시전압 등의 측정과 분석이 요구된다. 여기에 본 연구에서는 상용주파수 교류고전압 발생장치와 4/10 [μ s]와 8/20 [μ s]의 뇌충격전류를 발생시킬 수 있는 충격전류발생장치를 설계·제작하였으며, 누설전류의 측정과 분석을 위해 능동성 저역통과 필터와 대역필터의 누설전류 측정계를 구성하였다. 또한 ZnO 소자의 기본특성과약 후에 뇌충격전류는 군단위 및 연속적 인가방법을 적용하였다.

2.1 실험장치

ZnO 소자의 뇌충격전류에 의한 열화특성에 관한 연구를 수행하기 위하여 그림 1과 같이 실험장치 및 측정계를 구성하였다.

직류고전압 발생장치, 뇌충격전류 발생장치, 상용주파수 교류전압 인가장치 및 측정회로로 구성하였으며, 뇌충격전류 발생장치는 최대 4/10 [μ s] 5 [kA]와 8/20 [μ s] 3 [kA]를 발생시킬 수 있다. 상용주파수의 교류전압 인가장치는 양질의 전원공급을 위하여 L-C 필터를 사용한 후, 고압으로 변성하였다.

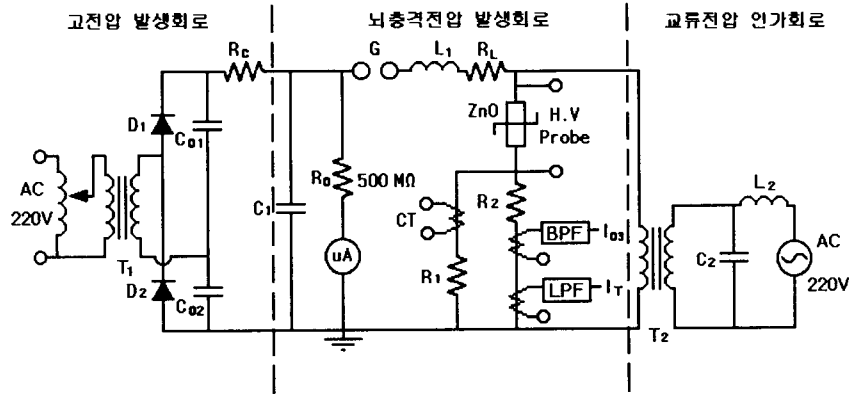


Fig. 1 Configuration of the experimental system

그림 2는 뇌충격전류 인가시 ZnO 소자를 흐르는 방전전류와 소자 양단에서 측정된 전압파형의 예를 나타낸 것이다. 1회에 인가되는 에너지는 4/10 [μ s] 5 [kA]의 경우 약 528 [J]이며, 8/20 [μ s] 3 [kA]에서는 약 739 [J]이 인가된다.

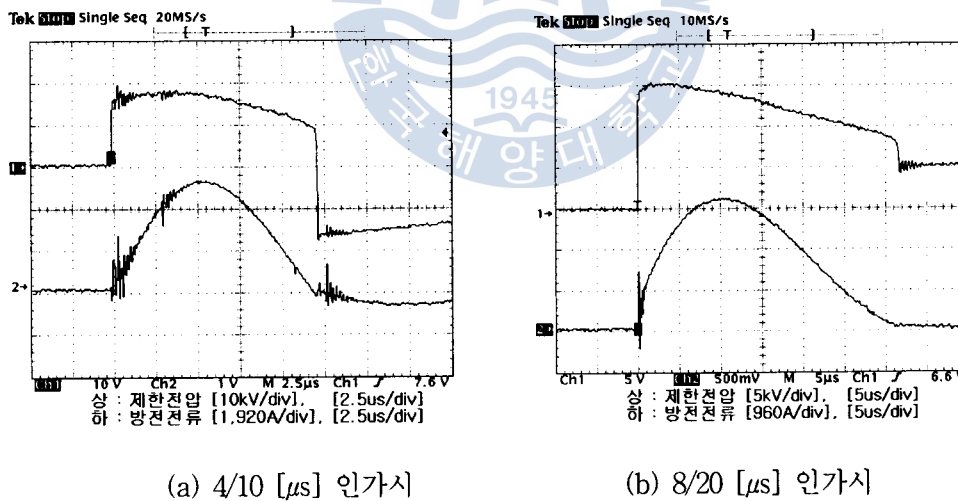


Fig. 2 Typical waveforms to lightning impulse current

ZnO 소자의 열화판단에 중요한 정보로 누설전류는 관통형 변류기로 검출하고, 차동증폭기와 능동성 저역통과필터 및 대역통과필터에서 전체누설전류와 누설전류의 고조파 성분을 측정할 수 있도록 하였다. 본 연구에서 설계한 저역통과필터의 차단주파

수는 540 [Hz], 대역통과필터의 중심주파수는 180 [Hz]로 하고, Q값은 10으로 설계하였다.

2.2 실험방법

실험은 ZnO 소자의 기본특성을 측정하고, 뇌충격전류의 인가에 따른 ZnO 소자의 특성변화를 비교·분석하는 순서로 하였다.

기본특성 실험으로는 온도 변화에 따른 실험과 ZnO 소자 정격전압에서의 누설전류, 동작개시전압을 측정하였다. 온도 변화에 따른 ZnO 소자의 누설전류의 측정은 ZnO 소자를 20~100 [°C]로 가열한 상태에서 정격전압을 15초간 인가한 후, 필터를 통해 누설전류를 측정하였다.

뇌충격전류인가에 의한 특성평가는 뇌충격전류를 군단위 또는 연속적인 방법으로 인가하면서 필터를 통해 누설전류를 측정하고, 뇌충격전류의 인가시(1분간격)마다 방전전류와 제한전압을 측정하였다. 뇌충격전류의 군단위 인가방법에서는 군단위 마다 1시간 동안 냉각시킨 후, ZnO 소자가 파괴될 때까지 반복해서 실험하였으며, 연속적인 인가방법에서는 냉각하지 않고 주위온도에서 1분 간격으로 충격전류를 인가하면서 누설전류, 제한전압, 방전전류 및 동작개시전압의 변화를 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 기본특성 실험

본 연구에서 적용한 ZnO 소자는 배전용 피뢰기(애관내에 ZnO 소자 4개로 구성)에 사용되는 소자를 분리한 것으로 소자의 정격전압과 정격전류는 4.5[kV], 5[kA]이다. 따라서 22.9kV·y의 국내배전계통에 연결될 경우, 정상운전시 소자 1개에 인가되는 전압은 3.3 [kV]가 된다.

실험초기의 기본특성으로 누설전류의 측정은 그림 3과 같이 ZnO 소자의 정격전압에 대해 40 [%], 60 [%], 80 [%], 100 [%]와 정상운전상태 전압인 3.3 [kV]에서 측정하였다. 전체누설전류는 ZnO 소자의 유전특성에 의한 충전전류가 대부분이며, 여기에 포함된 3조파 성분은 3.3 [kV]에서 약 30 [μ A]로 적게 나타났다. 또한 전압 증가에 따라 전체누설전류와 3조파 성분도 증가함을 알 수 있다.

그림 4는 ZnO 소자를 20 [°C]부터 100 [°C]까지 가열할 때, 각 온도에서 5분간 유지시킨 후 누설전류의 변화를 측정하여 나타낸 것이다. 온도의 증가에 따라 전체누설전류와 3조파 누설전류가 증가하였으며, 특히 온도가 증가할수록 3조파 성분이 많이 증가하였다. 우리 나라 여름철의 온도가 40 [°C]이하이므로 이 범위에서는 온도상승에 의

한 누설전류를 고려하지 않아도 ZnO 소자의 열화판단에는 큰 영향이 없을 것으로 판단된다.

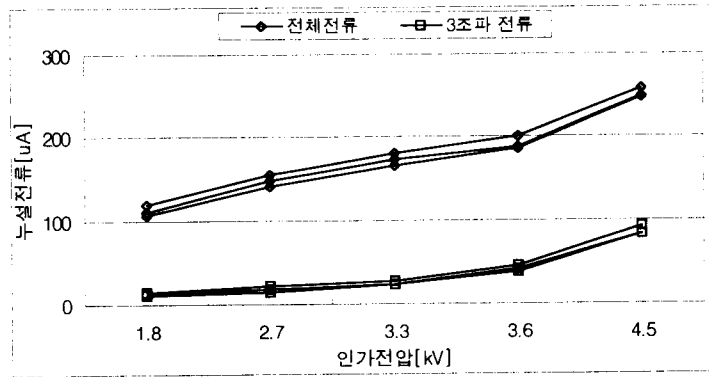


Fig. 3 Changes in leakage current caused by applied A.C voltage

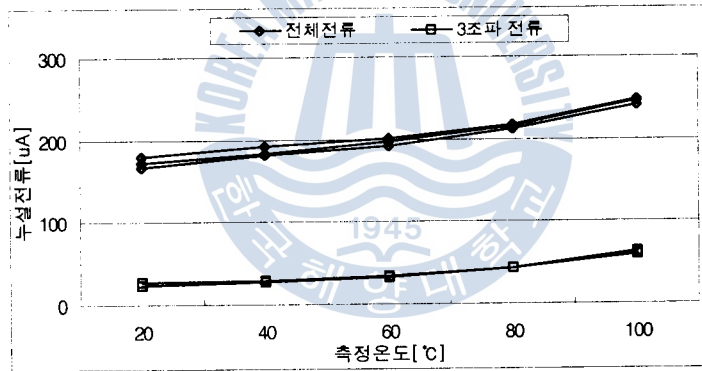


Fig. 4 Changes in leakage current caused by temperature

3.2 충격전류 인가에 의한 실험

4/10 [μ s], 5 [kA]와 8/20 [μ s], 3 [kA]의 뇌충격전류를 ZnO 소자에 인가할 때, 1회에 인가되는 에너지량은 각각 528 [J], 739 [J]로 최대값은 4/10 [μ s]가 크지만, 에너지량은 8/20 [μ s]가 크게 되는 조건에서 실험하였다. 그림 5는 8/20 [μ s] 뇌충격전류의 군단위 인가방법에 의한 실험시 ZnO 소자의 동작개시전압의 변화를 나타낸 것으로, 수 백회의 뇌충격전류 인가에도 불구하고 직류 및 교류에서 동작개시전압은 거의 변화가 없었으며, 파괴 후 급격히 감소하는 경향을 나타내었다.

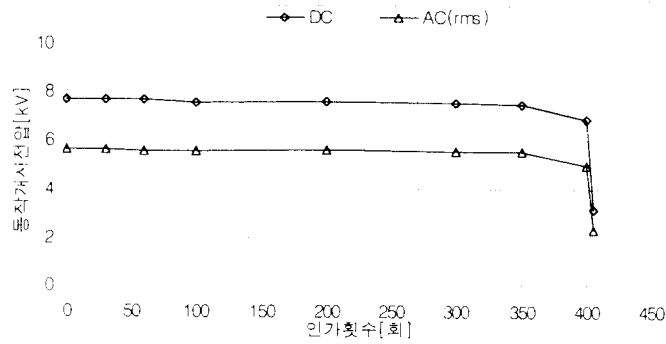


Fig. 5 Changes in reference voltage by overtime lightning impulse current

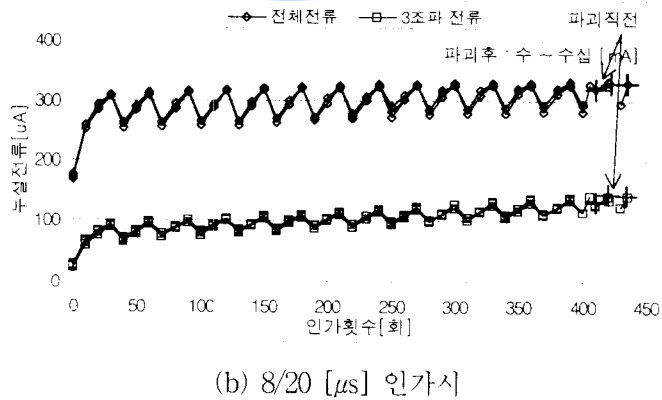
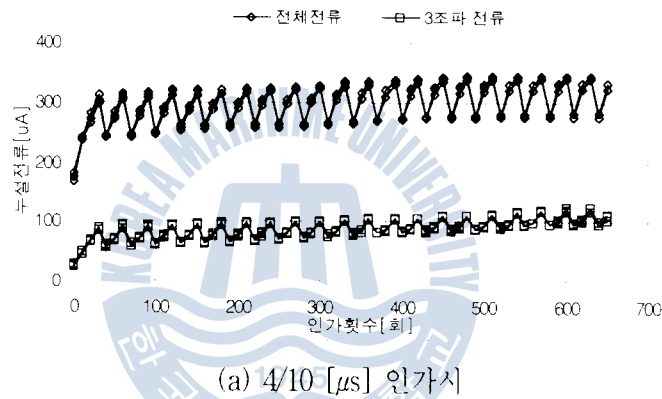


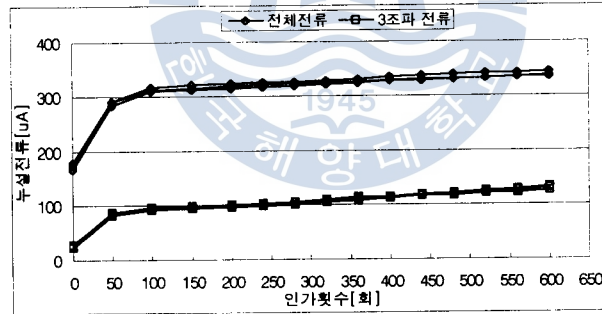
Fig. 6 Changes in leakage current by overtime lightning impulse current

그림 6은 ZnO 소자에 3.3 [kV]의 상용주파수 교류전압이 인가된 상태에서 뇌충격전류의 균단위 인가에 의한 소자의 누설전류 변화특성을 나타낸 것으로, 4/10 [μ s]와

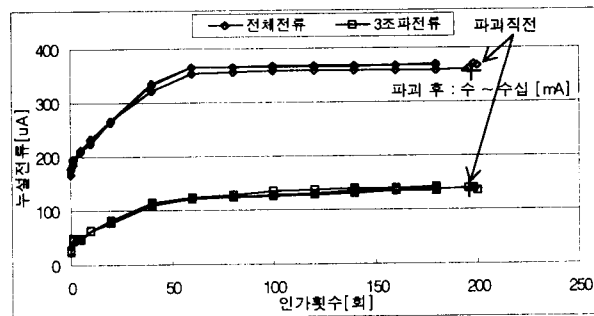
8/20 [μs]의 뇌충격전류를 1분 간격으로 30회 인가후 1시간 이상의 충분한 냉각 과정을 반복하면서 전체누설전류와 3조파 누설전류를 측정하였다. 뇌충격전류의 인가에 의해 누설전류는 초기에 급격한 증가를 보였으며, 그 후 서서히 증가하였다. 각 군마다 냉각 후에 처음 인가시에는 ZnO 소자가 냉각되었기 때문에 누설전류도 낮게 측정되었다.

본 실험에서 ZnO 소자는 4/10 [μs] 뇌충격전류 인가의 경우 누설전류는 8/20 [μs] 뇌충격전류 인가시에 비해 서서히 증가하였으며, 650회 이상에서도 파괴되지 않고 정상적으로 남아 있었다.

한편, 8/20 [μs] 뇌충격전류에서 각각 406회, 421회, 436회에서 파괴되었으며, 파괴된 ZnO 소자는 상용주파수 교류전압 3.3 [kV]에서 누설전류가 1 [mA] 이상이 되어 계속적으로 연결하였을 경우는 자체적으로 누설전류에 의해 과열상태를 나타내었다. 마찬가지로 배전선로의 피뢰기도 열화된 소자를 내장하고 있으면, 배전선로의 운전전압에서도 과열상태가 지속되고 이로 인해 피뢰기가 소손되면서 2차적인 지락사고로 진행될 수 있음을 확인하였다. 이것으로부터 ZnO 소자의 뇌충격전류에 의한 열화는 과형의 과두준도와 충격전류의 파괴값보다는 1회에 인가되는 에너지량이 더 큰 영향을 미친다고 생각된다.



(a) 4/10 [μs] 인가시



(b) 8/20 [μs] 인가시

Fig. 7 Changes in leakage current by overtime lightning impulse current

그림 7은 뇌충격전류의 군단위 실험과 동일한 조건에서 뇌충격전류를 연속적으로 인가할 때, 누설전류 변화를 나타낸 것이다. 4/10 [μ s] 5 [kA]의 뇌충격전류를 인가한 경우, 누설전류는 100회 정도까지 급격한 증가를 나타내었으며, 전체누설전류와 3조파 누설전류 모두 증가하였으나 600회 이상에서도 파괴되지 않았다. 8/20 [μ s] 3 [kA]의 뇌충격전류를 인가한 경우에도 전체누설전류와 3조파 누설전류의 크기는 약 50회 정도까지 급격히 증가하는 경향을 나타내었으며, 그 후 전체누설전류는 서서히 증가하여 어느 정도 이상에서는 누설전류의 증가량을 검출하기가 어려웠으나, 3조파 누설전류는 지속적인 증가를 보였으며, 실험에 사용한 소자 모두 200회 부근에서 파괴되었다.

뇌충격전류의 군단위 실험과 비교하면 ZnO 소자가 가열된 상태에서 연속적으로 뇌충격전류가 인가되므로 누설전류도 크게 나타났으며, ZnO 소자가 파괴된 시기도 8/20 [μ s] 3 [kA]의 군단위 인가방법에서는 400회 이상이었으나, 연속인가 방법에서는 ZnO 소자 모두 200회 부근에서 파괴되었다.

이상의 실험으로부터 ZnO 소자는 뇌충격전류의 흡수에 의해 전체누설전류와 3조파 누설전류가 증가하는 경향이 있었다. 뇌충격전류의 흡수에 의한 ZnO 소자의 전체누설전류는 초기에 급격하게 상승한 후, 서서히 증가하지만, 3조파 누설전류는 파괴직전까지 계속 증가하므로 향후 송배전계통에 설치된 피뢰기의 열화판단기준 자료로 적용할 수 있을 것으로 생각된다.

제 4 장 결 론

본 논문에서는 뇌충격전류에 의한 산화아연소자의 열화특성을 파악하기 위하여 뇌충격전류 발생장치와 누설전류 측정장치를 설계·제작하였으며, 기본특성실험과 뇌충격전류의 인가실험으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 산화아연소자의 보호동작원리와 열화요인을 파악하였으며, 전력계통에 발생하는 뇌충격전류를 모의하기 위한 4/10 [μ s]와 8/20 [μ s]의 충격전류 발생장치를 이론적으로 해석하고 설계·제작하였다.
2. 상용주파수 교류전압이 인가된 상태에서 산화아연소자의 누설전류는 용량분 전류가 대부분이고 저항분 전류는 매우 적게 나타났으며, 누설전류의 3조파 성분의 변화가 현저하였다.
3. 뇌충격전류의 흡수에 따라 산화아연소자의 동작개시전압과 제한전압은 파괴직 전까지 거의 변화가 없었으며, 정상운전전압에서 산화아연소자의 누설전류는 온도상승에 따라 증가하였으나, 정상상태의 소자는 주위온도 40 [$^{\circ}$ C]에서 열화가 진전된 소자의 누설전류보다는 훨씬 작게 나타났다.

4. 뇌충격전류에 의한 산화아연소자의 열화진전에는 뇌충격전류의 파괴값 보다 1 회에 인가되는 에너지량이 중요한 요소이며, 뇌충격전류의 흡수에 의한 소자의 전체누설 전류는 초기에 급격하게 상승한 후 서서히 증가하지만, 3조파 누설전류는 파괴직전 까지 계속 증가하므로, 향후 송배전 계통에 설치된 피뢰기의 열화 판단에 적용할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 한가지 시료에 대하여 연구를 수행하였지만, 현재 국내 배전계통에는 4~5 종의 피뢰기가 설치되어 있으므로, 이에 대한 비교 연구와 온·습도의 변화에 대한 연구를 수행할 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] W. G. Carlson et al, "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, pp. 67~74, 1986.
- [2] S. Shirakawa et al, "Maintenance of Surge Arrester by Portable Arrester Leakage Current Detector", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 3, pp. 998~1003, 1988
- [3] 岡藤伸夫 外, "酸化亞鉛形避雷器の漏れ電流檢出方式の提案", 日本電氣學會電力·エネルギー部門大會, pp. 850~851, 1994