

가속열화시험에 의한 18kV ZnO 피뢰기의 누설전류 특성분석

論 文
51C-2-2

Leakage Current Characteristics of 18kV ZnO Lightning Arresters by Accelerated Aging Test

金周勇*·宋一根*·金燦泳**·文在德***
(Ju-Yong Kim · Il-Keun Song · Chan-Young Kim · Jae-Duk Moon)

Abstract - This paper provides the results of accelerated aging test of 18kV ZnO lightning arresters to investigate the leakage current characteristics. It was impossible to establish the replacement criterion for field operating lightning arrester because conventional aging test was only focused on the aging of ZnO elements. In general, it is possible to replace the aged arresters before the failure in the field using the leakage current measurement because it must be increased by the aging. But we can not use the method because we don't know the characteristics of the installed lightning arresters. Therefore in this paper we applied operating voltage and accelerating cycle which consists of temperature and humidity to the arresters. Then we measured the variation of total and resistive leakage current and found out the characteristics of the aged lightning arresters.

Key Words : ZnO, Lightning arrester, Optimal replacement, Aging, Total leakage current, Resistive leakage current, Accelerated aging

1. 서 론

국내 배전선로에 22.9 [kV]급 배전용 피뢰기가 2001년 12월 기준으로 약 80만개가 낙뢰, 유도뢰 등의 과전압으로부터 배전 및 수용가 설비를 보호할 목적으로 설치되어 있다. 일본의 피뢰기 교체주기는 산화아연형 피뢰기의 권장교체주기(JEC 217)[1]가 약 15년으로 되어있는 반면, 국내는 내용년수를 35년으로 정해놓고 있으나 일반적으로 고장이 발생하거나 선로이설 공사가 있을 경우에 교체하고 있는 실정이다. 따라서 배전용 피뢰기에 의한 고장을 감소시키기 위해서는 피뢰기에 대한 특성평가를 통하여 적정교체주기 및 운용기준 제정을 통한 적절한 유지보수가 필요하게 되었다. 이를 위해서는 피뢰기의 열화특성분석을 위한 장기신뢰성 평가가 필수적이거나, 마땅한 평가방법이 없는 실정이다.

피뢰기의 구성을 보면 크게 애관과 특성소자로 구성되며, 현재까지 피뢰기의 수명예측 및 신뢰성 평가를 위한 방법은 특성소자 평가에만 의존하고 있다. 하지만 피뢰기 고장의 유형을 살펴보면 피뢰기에 특성소자 자체의 열화 외에도 가스켓 열화에 의한 흡습이 또 하나의 고장원인으로 작용하고 있으므로[2] 현재 국제규격[3][4][5]에서 제시하는 소자 시험방법만으로 피뢰기의 장기신뢰성을 평가하기는 불가능하다.

현재 국내·외에서 사용되는 피뢰기 장기신뢰성 평가장치

는 특성소자에 운전전압을 인가하고, 일정온도를 유지하면서 이에 따른 누설전류 증가를 측정하는 방법을 이용하고 있다. 하지만 본 논문에서는 피뢰기 완제품에 대한 열화특성을 평가하기 위해 선로전압이 인가된 상태에서 온도 및 습도를 가변하면서 피뢰기의 누설전류 변화를 감시할 수 있는 가속열화시험장치를 제작하고, 피뢰기의 특성분석을 실시하여 현장 운전중인 피뢰기의 누설전류 특성을 모의함으로써 피뢰기 열화평가를 위한 데이터를 확보하고자 하였다.

2. 시험장치 및 시험방법

2.1 피뢰기의 기본특성

현재 사용되고 있는 피뢰기는 세라믹 애관 내부에 ZnO 소자를 직렬로 적층하고 하부에 단로기가 부착된 것이며, 항상 선로전압이 인가되는 상태로 운전되므로 평상시에 누설전류가 흐르게 된다.

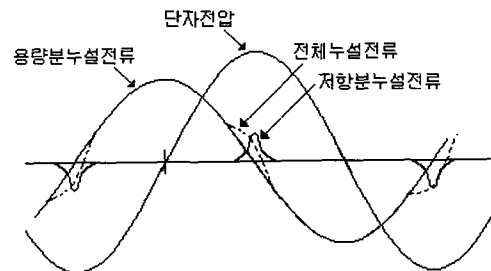


그림 1 피뢰기 누설전류파형

Fig. 1 Leakage current waveform of lightning arrester

* 正 會 員 : 電力研究院 電力系統研究室 先任研究員

** 正 會 員 : 又石大學 電氣工學科 專任講師 · 工博

*** 正 會 員 : 慶北大學 電氣工科 教授 · 工博

接受日字 : 2001年 4月 13日

最終完了 : 2001年 12月 21日

이러한 피뢰기의 전체 누설전류는 그림 1과 같이 소자의 용량성분에 의한 용량분 누설전류 I_c 와 피뢰기 소자의 입계층간에 형성된 저항층에 의한 저항성분 누설전류 I_r 로 이루어져 있다.[6]

한편 피뢰기의 열화요인은 상시과전, 서지흡수, 흡습 및 오손 등이며 이로인해 피뢰기 소자의 고저항 입계층이 손상되거나 ZnO 입자가 성장하여 누설전류가 지속적으로 증가하고 결국에는 열폭주에 이르게된다.

이처럼 피뢰기의 열화특성을 가장 잘 평가할 수 있는 방법은 누설전류를 측정하는 방법이므로 본 논문에서는 피뢰기의 가속열화시험을 통해 열화에 의한 누설전류의 특성분석을 실시하였다.

2.2 가속열화시험장치 제작

현재까지 피뢰기의 가속열화시험은 피뢰기 소자 자체의 수명예측을 위한 온도가속시험이 사용되고 있다. 하지만 피뢰기는 소자뿐 만 아니라 애관, 밀봉장치, 내부 지지물 등 다양한 요소로 구성되어 있으므로 현장에서의 수명은 이들의 영향을 모두 고려할 때 가능하다. 따라서 본 논문에서는 실 피뢰기에 대한 가속열화가 가능하도록 그림 2와 같이 가속열화시험장치를 제작하여 신품과 열화품의 누설전류 특성을 파악하여 피뢰기 열화평가 자료로 활용하고자 하였다.

본 연구에서 제작한 피뢰기 장기신뢰성 시험장치는 피뢰기에 상시운전전압인 13.2[kV]를 인가한 상태에서 챔버 내부의 온도, 습도를 변화시키면서 피뢰기의 누설전류 변화를 관찰할 수 있는 장치이다. 이 장치는 고전압 발생부, 항온항습부, 누설전류 측정부, 데이터 취득 및 제어부분 등으로 구성되었다.

고전압 발생부는 시료 피뢰기에 일정한 입력전압을 유지하기 위한 것으로 교류전압(13.2[kV], 60[Hz])을 피뢰기에 인가하기 위한 것이다.

항온항습부는 효과적인 가속열화를 위해 -40[°C] ~ 200[°C] 까지 온도 제어가 가능하도록 설계되었으며, 온도 승/감은 성능은 승은 6[°C/min], 감은 2[°C/min]이다. 습도는 95[%]까지 변화가능하게 하여 열화된 밀봉부위에서의 흡습이 가능하게 하였다. 항온항습부내에는 6개의 시료가 설치되며 한 대의 변압기가 두 개의 시료에 전원을 공급하도록 구성하였다.



그림 2 피뢰기 가속열화 시험장치
Fig. 2 Accelerated aging test facility for lightning arresters

누설전류 측정부에서는 피뢰기 열화인자 중 가장 중요한 전체 누설전류 및 저항분 누설전류 측정을 위해 각 시료의 접지선에 누설전류 측정용 저항을 연결하여 누설전류를 관찰

할 수 있도록 하였으며, 온·습도의 변화를 포함한 실험조건 변화와 시간의 경과에 따른 누설전류 변화를 측정하여 열화 과정을 상세히 관찰 할 수 있도록 구성했다. 한편 각 피뢰기의 저항분 누설전류, watt loss의 정밀한 측정을 위해 Nihon Keisokuki Seizosho Co.의 CT와 누설전류 검출기(Leakage Current Detector-4)를 사용하여 필요시 해당 시료의 접지측에 설치가능 하도록 구성했다.

또 습기로 인한 피뢰기 애관 외부의 누설전류 영향을 배제하기 위해 각 시료의 애관 외부를 별도의 접지선으로 연결하여 접지하였다.

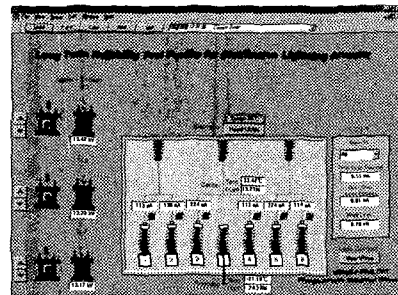


그림 3 제어 및 데이터 취득 프로그램 화면
Fig. 3 Display of control and data acquisition program

피뢰기의 가속열화를 위해서는 피뢰기 사용환경을 가속 모의할 수 있는 열화주기가 필요하다. 이를 위해 본 논문에서는 컴퓨터 프로그램상에서 원하는 열화주기를 편리하게 작성할 수 있도록 하였으며, 전체 시스템의 동작상황 및 제어가 가능하도록 그림 3과 같이 가속열화시험장치 운용 및 데이터 취득 프로그램을 개발하였다. 본 논문에서 사용한 가속열화 시험주기는 그림 4와 같이 한 주기가 12시간이고 -35[°C] ~ 90[°C]의 온도변화와 20[%] ~ 90[%]의 습도 변화를 가진다.[7]

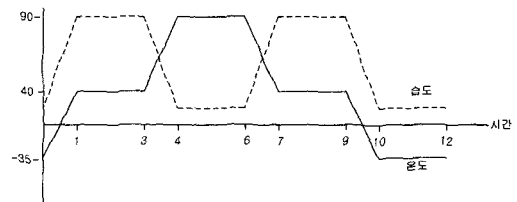


그림 4 시험주기(총 12시간)
Fig. 4 Test cycle(total 12 hours)

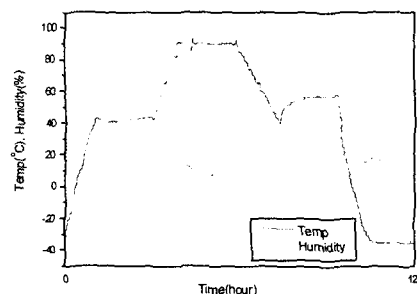


그림 5 가속열화 시험장치의 운전상태
Fig. 5 Operating status of accelerated aging test facility

한편 제작한 가속열화시험장치의 동작특성을 평가하기 위해 그림 4의 시험주기에 맞도록 동작시킨 결과, 그림 5와 같이 온도와 습도가 양호한 운전특성을 보이는 것으로 나타났다.

3. 시험결과 및 고찰

3.1 신제품피뢰기의 특성시험

먼저 피뢰기의 기본적인 특성 및 가속열화에 따른 변화를 관찰하기 위해 4개의 제조업체에서 생산된 신제품에 대해 가속열화 시험을 실시했다. 각 시료별 재원은 다음과 같다.

표 1. 신제품시료

Table 1. New specimens

시료	1-1	1-2	1-3	1-4
재원	I사('99)	S사('99)	K사('99)	A사('99)

피뢰기에 시험전압 13.2[kV]를 인가한 후 그림 4에서 제시한 시험주기를 반복적으로 인가하면서 측정된 누설전류 변화 추이는 그림 6과 같다. 전체 누설전류는 실효값으로 측정하였으며 시간에 대한 함수로 나타났다.

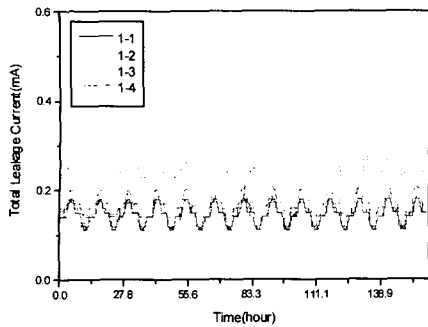


그림 6 각 시료별 전체 누설전류 변화
Fig. 6 Total leakage current of specimens

그림 6과 같이 신제품의 전체 누설전류가 업체별로 초기값의 차이는 있지만 온도 90[°C], 전압 13.2[kV]에서 300[μA]를 초과하는 시료가 없었으며, 일반적인 현장 운전온도인 40[°C] 정도에서는 약 170~250 [μA] 내외의 누설전류가 흐름을 알 수 있다. 신제품 피뢰기의 누설전류는 온도패턴을 따라 증감하였고, 습도에 의한 영향은 받지 않는 것으로 밝혀졌다. 본 실험에서 사용한 온도상승률은 -35~40[°C]범위는 시간당 75[°C]이고, 40~90[°C]범위는 시간당 50[°C]로써, 자연현상에 의한 온도상승률보다 매우 큼에도 불구하고 습도에 의한 영향을 받지 않는 것으로 나타나 피뢰기 내부로의 수분침투가 외부환경에 의한 것이 아니라 피뢰기 동작시의 내부압력 상승에 의한 호흡작용 때문에 발생하는 것으로 판단된다. 또한 본 실험에서 인가한 최대 온도인 90[°C]에서 2시간 동안 머무는 동안에 누설전류는 최대값을 유지하고 증가하지 않은 것은, 누설전류에 의한 주열열보다 방출되는 열이 많기 때문에 소자는 정상적인 동작을 수행한 것으로 판단된다. 한편 시료 1-4의 저항분 누설전류 또한 그림 7과 같이 온도변화에 대해 일정한 범위가 유지되며, 저항분 전류 피크치는 온도 90[°C]에

서 90[μArms]로써 실효값으로 계산하면 약 64[μArms]이고, 이것은 90[°C]에서의 전체 누설전류 190[μArms]의 약 33%로 나타났다. 본 논문에서 저항분 누설전류의 최대치를 측정하는 것은 일반적으로 피뢰기의 열화에 따른 누설전류 증가시에 누설전류의 실효치의 변화는 크지 않더라도 최대치의 증가는 현저하기 때문에 피뢰기의 열화평가에서는 최대치를 측정하는 것이 효과적이기 때문이다. 최대치로 측정된 저항분 누설전류의 패턴이 전체 누설전류의 패턴과 같이 일정하게 유지되는 이유는 저항분 전류에 의하여 발생하는 주열열이 충분히 방산되고 있음을 의미한다.

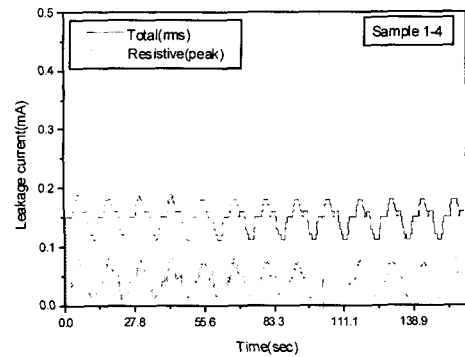


그림 7 시료 1-4의 전체누설전류 및 저항분 누설전류 피크치
Fig. 7 Total and peak resistive leakage current of specimen 1-4

3.2 경년품 피뢰기의 특성시험

본 연구에서는 현장에서 운전중인 피뢰기의 열화상태를 평가하기 위해 총 16개의 경년품시료에 대해 가속열화시험을 실시하고 누설전류특성을 분석하였다.

먼저 경년품의 특성을 평가하기 위해 표 2와 같이 시료를 설치하였다. 여기서 시료 2-5와 시료 2-6은 현장 운전중 단로기가 분리되어 철거된 제품으로서 열화의 가능성이 매우 높은 시료이다.

표 2. 장기 신뢰성 시험시료

Table 2. Field aged specimens

시료	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	2-6
재원	A사('93)	I사('93)	S사('96)	K사('95)	A사('94)	A사('95)

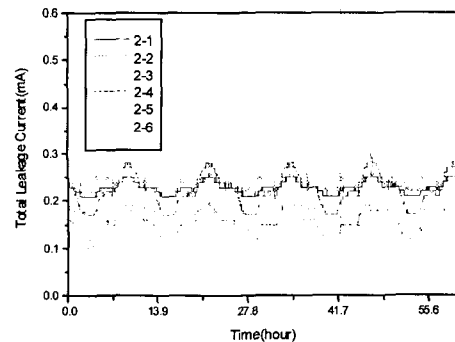


그림 8 시료별 전 누설전류 변화
Fig. 8 Total leakage current of specimens

그림 8에서 처럼 경년품 피뢰기의 전체 누설전류 변화는 신품 시험에서의 유사하게 누설전류의 크기는 300[μ A] 미만에서 온도에 따라 변하는 것으로 나타났다. 하지만 시료 2-2의 누설전류는 그림 9와 같이 운전온도에 비례하는 반면 시료 2-3, 시료 2-5, 시료 2-6은 각각 그림 10, 그림 11, 그림 12와 같이 -35[$^{\circ}$ C]에서 40[$^{\circ}$ C]로 온도가 증가하는 구간에서 누설전류가 급증하는 것으로 나타나 다른 시료와 차이가 있었다. 특히 시료 2-6의 저항분 누설전류를 관찰한 결과 그림 12와 같이 -35[$^{\circ}$ C]에서 40[$^{\circ}$ C]로 온도가 증가하는 구간에서 급증하였다.

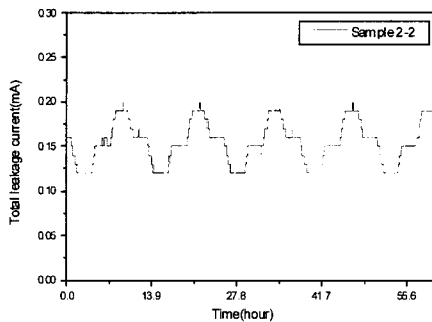


그림 9 시료 2-2의 전체 누설전류 변화
Fig. 9 Total leakage current of specimen 2-2

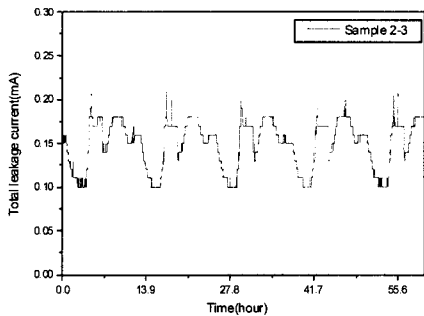


그림 10 시료 2-3의 전 누설전류 변화
Fig. 10 Total leakage current of specimen 2-3

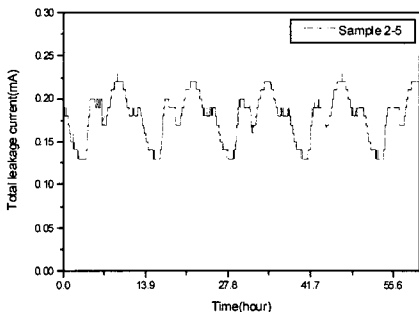


그림 11 시료 2-5의 전 누설전류 변화
Fig. 11 Total leakage current of specimen 2-5

한편 이상의 경년품에 대해 가속열화 시험을 종료한 후 시료를 ES 153-261 ~ 283(한국전력 표준규격)[8]에 따라 규격 시험을 실시한 결과 표 2의 시료 중 시료 2-3과 시료 2-5가

대전류 동작책무시험에서 불량으로 판정되었다.

피뢰기 동작책무 시험은 파두장 3.5~4.5 μ s, 파미장 9~11 μ s, 충격전류 25kA \pm 10%를 피뢰기 소자에 인가하고 시험전 후 뇌충격제한전압 변화율이 10%이내이고 상용주파 인가시간동안 열적안정을 가지며, 소자에 관통, 섬락, 균열 등의 손상이 없는 지를 평가하는 시험이다. 이 시험에서 시료 2-3, 2-5는 소자의 연면이 파손되었다. 이는 소자가 열충격에 대한 안정성이 불량하기 때문으로 판단되며, 장기신뢰성 시험에서 나타난 온도상승시의 누설전류 급증과 관련이 있는 것으로 보인다.

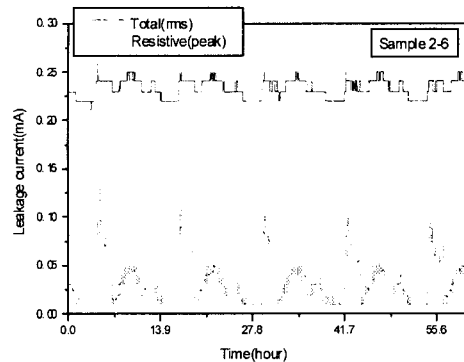


그림 12 시료 2-6의 전체 누설전류 및 저항분 누설전류 변화
Fig. 12 Total and peak resistive leakage current of specimen 2-6

시료 2-6의 경우는 규격시험에서 동작책무시험이 실시되지 않아 불량이라고 확정하기는 어렵지만 시료 2-3 및 시료 2-5와 동일한 특성을 보이는 것으로 보아 불량일 가능성이 매우 높은 것으로 판단된다.

이것은 시험주기중 -35[$^{\circ}$ C] ~ 40[$^{\circ}$ C] 구간의 온도변화가 시간당 75[$^{\circ}$ C]로써 가장 큰 온도 변화구간이므로 소자에 가해지는 열충격이 가장 크기 때문으로 생각된다.

이 결과를 볼 때 피뢰기 교체기준 수립에 있어서 누설전류의 크기에만 의존한 방법은 한계가 있음을 알 수 있다. 그러므로 피뢰기를 적기에 교체하기 위해서는 주기적인 누설전류 측정을 통한 누설전류 변화추이를 관찰 할 때만이 가능할 것으로 판단된다.

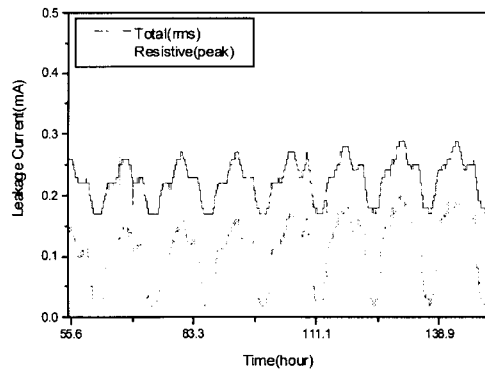


그림 13 열화된 시료의 누설전류
Fig. 13 The pattern of leakage current of aged specimen

또한 경년품 시험에서 몇 개의 시료는 그림 13과 같이 누설전류가 점차 증가하는 경우와 그림 14와 같이 전체 누설전류의 대부분이 저항분 누설전류가 차지하는 시료는 단시간내에 누설전류 급증에 의한 발열로 절연과피되는 경우도 있었다. 이러한 시료들은 소자의 방열특성이 저하되어 온도가 상승함에 따른 열을 충분히 방열하지 못함으로써 누설전류가 지속적으로 증가하고 이로 인해 소자의 온도상승이 가속하게 되어 결국에는 열폭주에 이르는 것으로 판단된다.

한편 누설전류 급증시료들의 저항분 누설전류는 전체 누설전류의 약 50%이상을 차지하고 있으며, 온도변화에 따른 누설전류의 크기 및 변동폭도 열화 주기가 증가하면서 점차 커짐을 알 수 있었다.

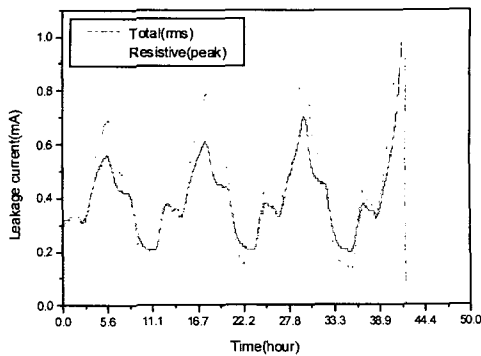


그림 14 열화된 시료의 열폭주
Fig. 14 Thermal runaway of aged specimen

4. 결 론

이상의 결과를 종합해 보면 피뢰기의 누설전류는 업체별로 약간씩 차이가 있으며, 주위온도에 가장 큰 영향을 받고, 누설전류가 크게 증가하지 않더라도 소자의 방열특성 저하에 의해 운전중 고장을 일으킬 가능성이 있는 것으로 나타났다. 그러므로 전체 누설전류의 절대값으로 양부를 판정하기는 매우 어려운 것으로 생각된다. 따라서 피뢰기의 적절한 교체를 위해서는 피뢰기 누설전류를 주기적으로 측정하여 온도변화에 의한 누설전류 변화량을 관찰함으로써 가능할 것으로 판단된다. 실험의 결과를 토대로 배전용 피뢰기의 누설전류 특성을 종합하면 다음과 같다.

- 건전한 피뢰기의 전체누설전류는 13.2[kV] 전압에서 대체로 110 ~ 300[μ A]정도의 값을 가지며 주위온이 높아지더라도 300[μ A]를 초과하지는 않는다.
- 피뢰기의 저항분 누설전류는 정상적인 운전상태에서 보통 10 ~ 50[μ Apeak] 정도이고, 주위온도가 상승하더라도 100[μ Apeak] 이하의 값을 가지는 것으로 나타났다.
- 열화된 피뢰기는 방열특성이 저하되어 온도가 급격히 상승할 경우 누설전류 증가에 의한 열을 충분히 방열하지 못함으로써 누설전류가 급증하게 된다. 그러므로 온도상승속도에 따른 누설전류 변화로부터 피뢰기 열화판정이 가능할 것으로 보인다. 그러나 피뢰기 누설전류는 선로상태 및 주위환경에 영향을 받기 때문에 교체를 위해서는 설치 초기상태의 누설전류를 기준으로 하여 증가정도를 파악하는 것이 중요하며 열화가 되었더라도 주위온도가 낮을 때는 정상제품과 유사한 누설전류 특성을 보이므로 기온이 높고 맑은 날 측정해야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] JEC-217, "酸化亞鉛形避雷器", 電氣學會, 1984
- [2] 송일근, 김찬영, 김주용, 한재홍, 이병성, "배전기자체의 수명예측 기준제정(최종보고서)", 전력연구원, 2000
- [3] ANSI/IEEE C62.11-1987, "IEEE Standard for Metal Oxide Surge Arrester for AC Power Circuit", IEEE, 1987
- [4] IEC 99-4, "Surge Arresters Part 4: Metal Oxide Surge Arresters without Gaps for A.C. Systems", IEC 1991
- [5] IEEE std C62.22-1991, "IEEE Guide for the Application of Metal Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems", IEEE 1991
- [6] "Type ZM-A, Leakage Current Detector for SORESTER Gapless Surge Arrester", Instruction Manual, Meiden
- [7] T. Taniguchi, K. Izumi, "Application of Polymer Insulating Materials for Surge Arrester Housing", CRIEPI 연구보고서 W89024, 1989
- [8] 한전표준구메시방서, "전력용 피뢰기", ES 153- 261 ~ 282, 1984

저 자 소 개



김 주 용(金周勇)

1969년 9월 27일생. 1992년 경북대 공대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 전력연구원 전력계통연구실 선임연구원.

Tel : 042-865-5923

E-mail : kimjy@kepri.re.kr



김 찬 영(金燦泳)

1962년 9월 6일생. 1989년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1994년 미국 Colorado School of Mines 재료공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 재료공학과 졸업(공학박). 1997년-2001년 한전 전력연구원 선임연구원. 2001.3-현재 우석대 반도체전자자동차 공학부 전임강사.

Tel : 063-290-1695

E-mail : kimcy@woosuk.ac.kr



송 일 근(宋一根)

1961년 3월 3일생. 1984년 숭실대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 전력연구원 전력계통연구실 선임연구원.

Tel : 042-865-5920

E-mail : iksong@kepri.re.kr



문 재 덕(文在德)

1946년 7월 25일생. 1970년 경북대 물리학과 졸업. 1975년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1982년 일본 동경대 대학원 전기공학과(공학박). 현재 경북대 공대 전자전기 공학부 교수

Tel : 053-950-5601

E-mail : jdmooon@bh.kyungpook.ac.kr