

산화아연 피뢰기소자에 흐르는 저항분 누설전류의 검출기법

(A Detection Method of Resistive Leakage Current Flowing through ZnO Arrester Blocks)

이복희* · 강성만**

(Bok-Hee Lee · Sung-Man Kang)

요 약

본 논문에서는 ZnO 피뢰기 소자에 대한 내구성 평가와 열화실험을 위한 저항분 누설전류 검출장치의 개발과 열화진단기법에 대하여 기술하였다. 저항분 누설전류는 ZnO 피뢰기 소자가 정상상태인지 불안정상태인지에 대한 판단의 지표로서 사용할 수 있다. 본 논문에서는 보상회로로 구성된 저항분 누설전류 측정시스템을 설계하여 구성하고, 실증실험으로서 ZnO 소자에 대한 저항분 누설전류의 측정과 고속푸리에 변환기법(Fast Fourier transform)을 통해 저항분 누설전류의 주파수특성을 조사·분석하였다. 분석결과 제안한 저항분 누설전류의 측정 시스템은 실험실에서 산화아연 바리스터의 전기적·물성적 특성을 연구하고, 전력계통에 있어서 ZnO 피뢰기의 열화의 진단과 예측기술을 개발하는데 유용하게 활용할 수 있다.

Abstract

This paper presents a developed measuring device of resistive leakage current and a fundamental discussion of deterioration diagnosis for Zinc Oxide(ZnO) arrester blocks. We have developed the leakage current detection device for ageing test and durability evaluation for ZnO arrester blocks. The resistive leakage current can be used as an indicator to discriminate whether the ZnO arrester blocks is in good state or in bad. The resistive leakage current measuring system with the compensation circuit was designed and fabricated. The sample tests for ZnO arrester blocks were investigated by observing the resistive leakage current together with fast Fourier transform analysis. The proposed monitoring systems for the resistive leakage current can effectively be used to investigate the electrophysical properties of ZnO arrester blocks in laboratory and to develop the techniques of forecasting the deterioration of ZnO arresters in electric power systems.

1. 서 론

피뢰기(Lightning arrester)는 전력계통의 외부에

서 발생하거나 내부에서 발생하는 뇌서지, 개폐서지, 일시적 과전압 등의 큰 용량의 순시적 전기에너지를 대지로의 방출을 통하여 송전선로 및 발·변전 기기를 보호하는 역할을 한다. 1980년대 중반 이후부터 산화아연(ZnO)피뢰기가 연구·개발되어 발·변전소 및 송전선로에 광범위하게 사용되고 있다. 그러나 산

* 정회원 : 인하대학교 전자전기컴퓨터공학부 교수
** 정회원 : 인하대학교 대학원 전기공학과 박사과정
접수일자 : 2001년 3월 5일

화아연피뢰기는 직렬갭이 없으므로 계통운전전압이 직접 산화아연블록(ZnO block)에 인가되므로 상시 미소한 누설전류가 흐르게 된다[1]. 이 누설전류는 용량분과 저항분 누설전류의 합성으로 나타나며, 산화아연블록이 열화되면 용량분 전류는 거의 변하지 않으나 저항분 전류는 크게 증가하게 된다. 오랜 사용으로 자연적 또는 인위적 열화로 인해 피뢰기소자의 저항분 누설전류가 증가하게 되면 산화아연블록은 발열량이 증가하고 결국에는 열과피되어 보호장치로서의 역할을 충분히 발휘하지 못하고 사고를 유발시키게 된다[2]~[5].

피뢰기의 열화판정에는 정격전압, 제한전압, 최대 연속사용전압에서의 전력측정, 절연저항측정 등이 있으며, [6] 산화아연소자의 비선형 저항특성으로 인하여 성능이 저하되면, 누설전류의 저항분 성분이 증가하므로 저항분 누설전류는 산화아연피뢰기의 열화 정도를 판정할 수 있는 지시기(indicator)로서 이용될 수 있다[7].

현재 전력계통에 사용되고 있는 대단히 많은 수의 피뢰기의 교체는 사고에 의해 파손되거나 성능저하에는 불문하고 일정기간이 지나면 일괄 교체하는 방식을 채택하고 있는 실정이며, 기술적으로나 경제적으로 비합리적이다. 따라서 피뢰기의 성능에 대한 정확한 분석을 통하여 경제적인 피뢰기의 적정 교체주기 및 사고방지의 기술개발이 요구되고 있다. 따라서 본 연구에서는 피뢰기의 열화 정도를 검출하여 적정 교체와 사고 예방진단기술에 관련된 핵심적 기술의 개발을 목적으로 운전전압에 의해서 피뢰기에 흐르는 저항분 누설전류의 검출 및 분석기법의 도출에 중점을 두고 실증적 연구를 수행하였다. 피뢰기 열화에 직접적인 관련이 있는 저항분 누설전류를 측정하기 위해서 저항분 누설전류 검출용 보상회로를 구성하였다. 실제 전력용 피뢰기로 사용되는 산화아연소자에 상용주파수의 시험전압을 인가하여 보상회로를 통해 정확한 저항분 누설전류를 검출할 수 있음을 확인하였다. 온도변화에 따라 누설전류가 변동하는 경우 전체 누설전류, 저항분 누설전류를 정확히 검출할 수 있음을 입증하였으며, 연구결과의 효과적인 활용성에 대하여 검토·고찰하였다.

2. 측정장치 및 방법

2.1 저항분 누설전류의 측정회로

본 연구에서는 분석하고자 하는 산화아연 바리스터의 전기전도 특성을 나타내는 저항분 누설전류를 검출하기 위해서는 상용의 다목적 전류측정기로의 검출은 불가능하다. 따라서 저항분 누설전류를 검출할 수 있는 특수한 미소전류 측정기를 설계·제작하였다. 산화아연바리스터는 커패시터와 비선형 저항의 병렬 조합으로 등가화할 수 있으며, 따라서 바리스터에 흐르는 전체 누설전류는 저항분 누설전류와 용량분 누설전류의 합으로 이루어져 있다. ZnO바리스터에 전기전도에 의해서 흐르는 순수한 저항분 누설전류만을 측정하기 위하여 용량분 누설전류 성분을 기준(C_1) 커패시터를 이용하여 보상하는 방법을 적용하였다[8].

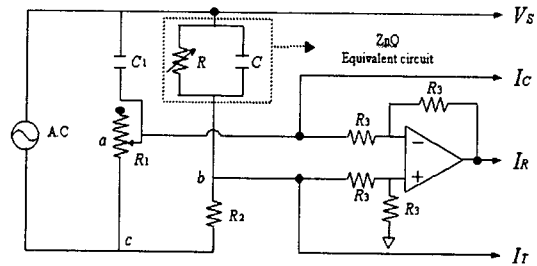


그림 1. 저항분 누설전류 측정하기 위한 보상회로
Fig. 1. A compensation circuit used for the measurement of the resistive leakage current

그림 1에 산화아연바리스터에 흐르는 저항분 및 용량분 누설전류성분을 분리하여 측정할 수 있도록 고안된 측정회로를 나타내었으며, 이 회로의 동작특성은 다음과 같은 회로방정식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} V_{ba} &= V_{bc} + V_{ca} \\ &= R_2 \times (I_R + jI_C) - I_{C1} \times R_1 \end{aligned} \quad (1)$$

$X_{C1} \gg R_1$ 일 때, I_{C1} 은 거의 용량분 누설전류라고 가정할 수 있고, 산화아연바리스터에 흐르는 용량분 누설전류가 기준 커패시터에 의해 완전 보상될 때 즉,

$$\| I_{C1} \times R_1 \| = I_C \times R_2 = V_{ac} \quad (2)$$

$$V_{ba} = I_R \times R_2 \quad (3)$$

$$I_T = \frac{V_{bc}}{R_2}, \quad I_R = \frac{V_{ba}}{R_2}, \quad I_C = \frac{V_{ac}}{R_2} \quad (4)$$

의 관계가 성립된다[9]. 이 때 저항 R_1 은 용량분 누설전류 성분이 인가된 전위의 영점교차점에서 제거 되도록 조정된다. 그리고 b 점과 a 점 사이의 전위차 ($V_{bc} - V_{ac}$)를 측정하기 위하여 차동증폭기를 이용하였다.

2.2 실험방법

산화아연 바리스터에 상용주파전압을 인가하여 산화아연 바리스터를 통해 흐르는 전체 누설전류로부터 보상회로를 이용하여 저항분 누설전류의 측정하고 온도조건에 따른 전압-전류특성을 조사하였다. FFT기법을 이용하여 저항분 누설전류의 주파수 해석과 온도 및 전압의 변화에 따른 각 고조파 성분들의 증가율을 조사하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 저항분 누설전류

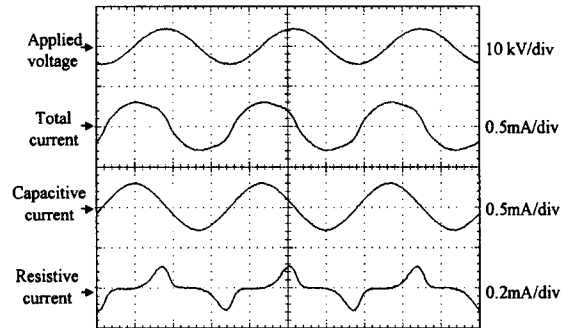
본 연구에서 실증실험에 사용한 시료인 산화아연 소자는 18[kV] 배전용 피뢰기로부터 채취하였으며, 이들의 규격과 전기적 특성은 표 1과 같다

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

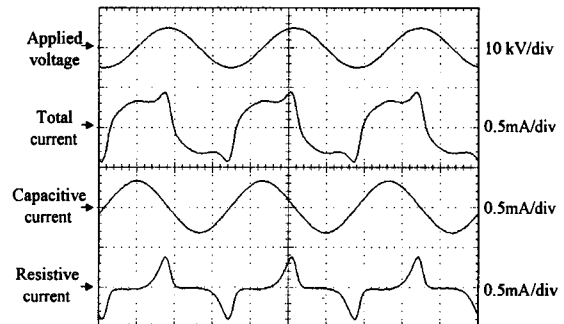
직경	33 [mm]
두께	29 [mm]
정격전압	3 [kV _{rms}]
정격방전전류	5 [kA _{crest}]
최대연속 운전전압	2.55 [kV _{rms}]
동작전압 (DC)	5.0~5.39 [kV] at 1 [mA]
제한전압	9.8 [kV _{peak}] at 5 [kA]

배전용 피뢰기(애관내에 산화아연소자 6개로 구성)로 사용되는 산화아연소사이며, 22.9[kV-y] 특고압 배전선로의 정상 운전조건에서 산화아연소자 1개에 인

가되는 전압은 2.2 [kVrms]이다. 그림 2에는 배전용 피뢰기에 사용하는 산화아연소자에 상온 25[°C]에서 4.5[kVp], 5.0[kVp], 5.2[kVp]인 상용주파 교류전압을 인가하였을 때 각각의 인가전압과 전체누설전류 및 보상검출장치를 이용하여 측정한 용량분 누설전류, 저항분 누설전류의 파형을 나타내었다. 전체 누설전류에서 인가전압보다 위상이 반주기 앞선 용량분 누설전류를 제거하여 저항분 누설전류를 정확하게 검출할 수 있음을 알 수 있다. 또한 저항분 누설전류는 인가전압의 피크치 부근에서만 흐르며, 정·부 대칭의 양방향성 특성을 보이고 있다. 그러나 인가전압의 피크치의 전에는 완만히 상승하며, 피크치를 지나서는 급격하게 감소하는 형태를 보이고 있다. 인가전압이 어느 한도를 지나서부터는 전압크기의 미소한 변동에 대하여도 저항분 누설전류의 크기는 대단히 크게 변동함을 알 수 있다.



(a) $V_s : 4.5$ (kVp) 5.00 (ms/div)
 $I_T : 310$ (μ Ap), $I_C : 310$ (μ Ap) $I_R : 130$ (μ Ap)



(b) $V_s : 5.0$ (kVp) 5.00 (ms/div)
 $I_T : 400$ (μ Ap), $I_C : 340$ (μ Ap) $I_R : 400$ (μ Ap)

산화이온 피뢰기소자에 흐르는 저항분 누설전류의 검출기법

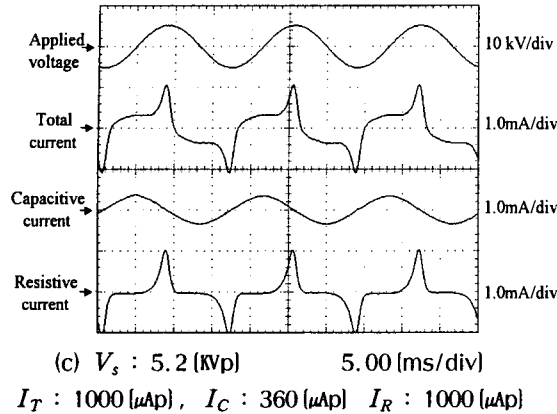


그림 2. 보상검출장치로 측정된 각 성분의 누설전류와 인가전압의 파형
Fig. 2. Waveforms of the applied voltage and each leakage current components measured by the compensation detection device

3.2 산화이온소자의 전압-전류특성의 온도의존성

산화이온피뢰기는 전력계통에 설치되어 사용되고 있는 도중에 주위온도의 변화와 운전전압에 의해 흐르는 누설전류로 인해 발생되어 온도가 상승하게 된다. 실제의 운전조건과 동일한 상태에서 산화이온소자의 특성의 변화를 정확하게 검출하는 것이 중요하며, 실용화를 위해 검증할 필요가 있다. 전력계통의 운전중인 상용주파 교류전압을 인가했을 때 흐르는 미소 누설전류 영역에서의 저항분 누설전류의 온도의존성을 반대수(semi-log)그래프로 그림 3에 나타내었다. 이 결과는 일정 온도의 항온조에 산화이온 피뢰기소자를 60분 동안 유지시킨 후 온도가 일정한 값이 되었을 때 각 인가전압에서 1분 동안 측정된 누설전류 피크치의 평균값으로 나타낸 것이다. 측정 온도 범위는 25℃에서 150℃이고, 그림 1와 같은 보상검출회로를 통해 검출한 저항분 누설전류의 피크값을 나타낸 것이다.

그림 3의 결과에서 알 수 있듯이 산화이온소자의 온도가 높아질수록 저항분 누설전류가 증가하였다. 일정한 전압에서 저항분 누설전류의 변화는 온도의 함수로 나타나며, 이는 산화이온소자가 저전계영역에서는 N형 반도체의 성질을 가지므로 저항분 누설전류는 온도증가에 따라 전류캐리어 밀도가 증가하게

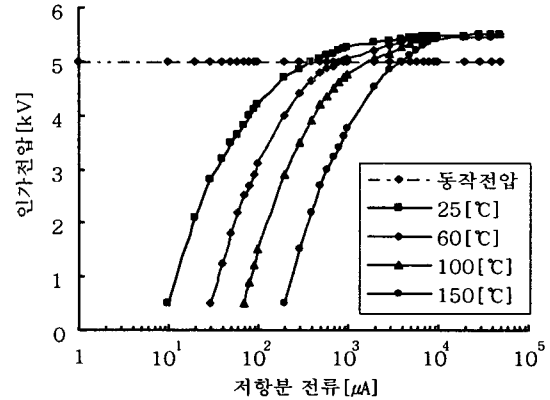


그림 3. 온도에 따른 저항분 누설전류의 특성
Fig. 3. Characteristics of the resistive leakage current as a function of temperature

되므로 강한 온도 의존성을 보인다.[10] 그러나 고전계영역에서는 온도의존성이 거의 나타나지 않으며, 강한 비선형 특성을 나타내고 있다. 즉, 저전계영역에서 저항분 누설전류는 다음 식 (5)와 같이 Arrhenius의 식으로 표현되는 변화를 보이는 것을 알 수 있다.

$$I_r = A \cdot \exp\left(-\frac{eV}{kT}\right) \quad (5)$$

k 는 볼츠만상수 : $0.86 \times 10^{-4} [eV/^\circ K]$
 A 는 물질의 고유상수

산화이온소자의 물리적 성질의 해석에 있어 실험실 연구에서는 직류 전압에 대한 특성을 분석하는 경우가 많이 있으나 실용성 측면에서는 교류 전압에 대한 특성의 해석이 중요하다. 본 연구의 결과는 저전계영역에서 V-I특성의 일정한 인가전압에 대한 온도의존성이 직류 전압에 대한 결과보다 작으며, 도통영역(수mA)에서의 교류 전압에 대한 제한전압은 직류 전압에 대한 동작전압보다 약간 높게 나타났다. 이와 같은 차이는 인가전압에 대한 전류응답의 시간지연의 결과에 기인된 것으로 보인다[11]. 저항분 누설전류의 온도의존성은 저전계 영역에서 현저하며 고전계 영역에서는 거의 나타나지 않았다. 특히 피뢰기의 열화 및 수명예측을 위하여는 저전계 영역에서의 특성을 상세하게 검토하는 것이 바람직하다.

3.3 저항분 누설전류의 고조파 성분

그림 4에는 상온 25[°C]에서 인가전압이 5.2[kVp] 일 때 산화아연 바리스터에 흐르는 전체 누설전류와 저항분 누설전류의 파형과 이들의 주파수분석에 대한 결과를 나타내었다. 주파수분석에 사용한 장비는 500 [MHz], 2.5 [GS/s], 4개 채널의 디지털 축적형 오실로스코프를 사용하였고, FFT 파형의 크기는 고속 프리에 변환기법상 실효치로 표시된다.

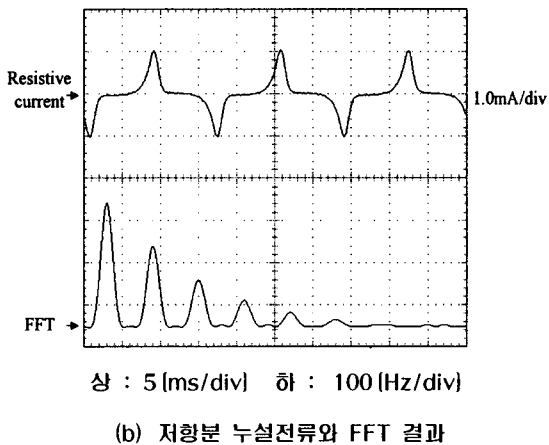
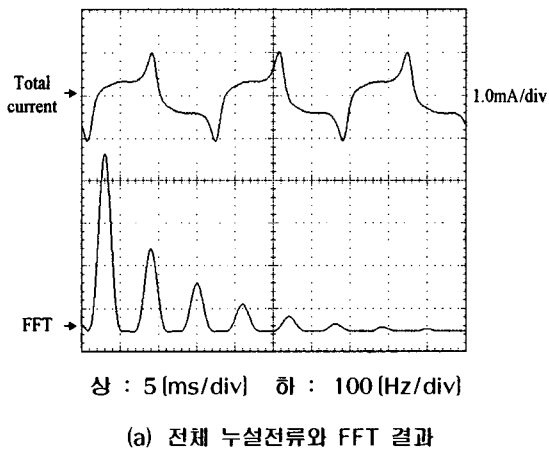


그림 4. 전체 누설전류와 저항분 누설전류의 파형과 FFT 결과
Fig. 4. The waveforms of the total leakage current and resistive leakage current and their FFT results

그림 4에서 보는 바와 같이 전체 누설전류 및 저항분전류는 정·부 양극성에 대해 대칭적인 파형으

로 이루어져 있으며, 이는 기본주파수 성분과 기수고조파 성분의 합으로 이루어져 있음을 알 수 있다. 저항분 누설전류의 피크값은 전체 누설전류의 피크값과 위상과 크기가 동일하므로 어느 일정한 크기 이상의 누설전류가 흐르는 조건에는 전체 누설전류의 피크값을 적용하여 피뢰기의 열화판정과 수명예측에 적용할 수도 있다. 그러나 열화의 정도가 미약하거나 인가전압이 낮은 경우는 저항분 누설전류가 작아 전체 누설전류의 피크치는 인가전압의 0인 순간에 그리고 저항분 누설전류의 피크치는 인가전압 피크치인 순간에 나타나므로 이러한 조건과 특성을 충분히 고려해야만 한다. 또한 FFT분석 결과 기본파를 제외한 3고조파 성분 이상의 기수고조파 성분의 크기는 전체 누설전류와 저항분 누설전류 모두 동일한 크기를 나타냈고, 기본주파수인 60[Hz]성분에 대해서는 전체 누설전류의 기본파 성분의 크기가 저항분 누설전류의 기본파 성분의 크기보다 높게 나타났다. 이 값은 보상회로에 의해 저항분 누설전류를 얻기 위해 전체 누설전류에서 제거(보상)시킨 용량분 누설전류의 크기에 상당하는 값을 나타낸 것으로 볼 수 있다. 용량분 누설전류의 주파수는 순수하게 인가전압의 주파수인 기본파성분만으로 구성되어 있는 것을 고려할 때 주파수 분석결과가 비교적 정확함을 알 수 있다.

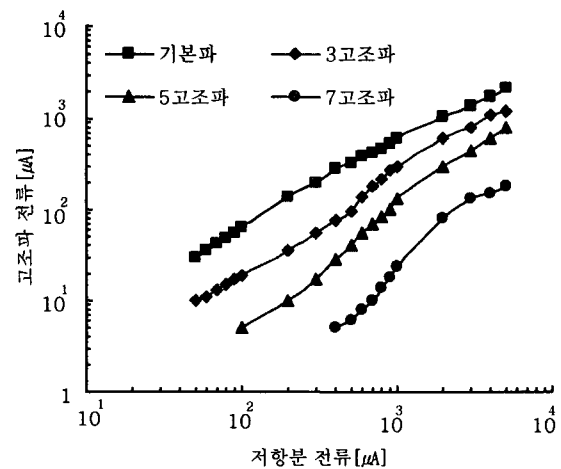


그림 5. 저항분 누설전류의 고조파성분
Fig. 5. Harmonic components included in the resistive leakage current

그림 5에는 보상검출장치를 이용해 상온 25[°C]에서 인가전압을 상승시키면서 검출한 저항분 누설전류를 고속프리에 변환기법을 이용해 기본파 성분을 포함한 제 7고조파 성분까지에 대한 함유성분의 특성을 나타내었다. 이때 전류의 크기는 피크치로 나타냈으며, 그림 4에서 나타낸 결과에서처럼 기본파인 60 [Hz]성분이 가장 크게 나타나고, 높은 차수의 기수고조파일수록 상대적인 크기는 작게 나타났다. 그러나 저항분 누설전류의 크기가 커질수록 기본파 성분의 크기의 증가율에 비해 고조파 성분들의 증가율이 크게 나타남을 확인할 수 있다. 특히, 제 3고조파인 180 [Hz]성분의 증가율이 고전계 영역에서 가장 크게 나타났다.

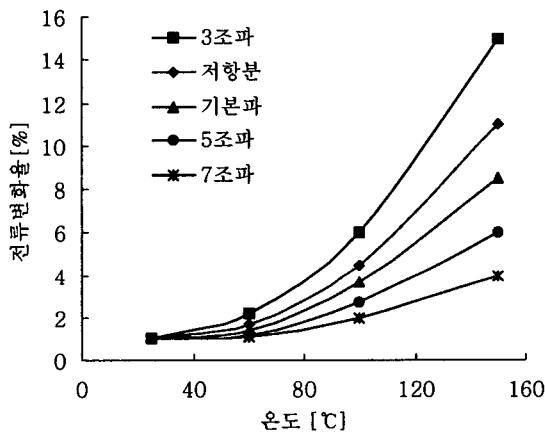


그림 6. 온도에 따른 저항분 누설전류 및 고조파 성분의 변화율

Fig. 6. Rate of changes of the resistive leakage current and harmonic components as a function of temperature

그림 3에서 얻은 결과에서 인가전압을 4.8 [kV]로 일정하게 하고 온도를 변화시키면서 측정된 누설전류의 변화율을 그림 6에 나타내었다. 온도의 변화(25, 60, 100, 150 [°C])에 따른 각 고조파 성분에 대한 변화율을 비교해 보면 제 3고조파 전류의 변화율이 가장 두드러지게 나타나고 저항분 전류, 기본파, 5고조파, 7고조파 순으로 나타났으며, 온도의 상승과 더불어 각 고조파 성분의 누설전류가 현저하게 증가함을 알 수 있다. 이러한 성질을 이용하여 온도에 따른 산화아연소자의 전기적 특성의 저하를 저항분 누설전

류의 변화율을 이용하여 검출하는 것도 효과적인 방법임을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 배전용 피뢰기로 사용되는 산화아연소자의 열화의 지표로 사용할 수 있는 저항분 누설전류 검출장치를 설계·제작하였으며, 실증실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 상용 주파수 전원전압이 인가된 운전상태에서 고조파성분을 포함하는 ZnO 소자에 흐르는 누설전류의 실신호를 변형 없이 측정할 수 있는 보상회로를 갖는 미소전류검출기를 구현하였다.

(2) 저항분 누설전류의 주파수분석 및 실증실험을 통해 저항분 누설전류 검출장치는 산화아연소자의 열화의 정도를 판단하는 지시기로서의 신뢰성이 있음을 검증하였다.

(3) 보상검출장치는 비교적 정확한 저항분 누설전류를 추출할 수 있으므로 ZnO 피뢰기소자의 열화특성과 물성해석의 연구에 활용될 수 있다. 그러나 피뢰기의 종류와 규격, 주위온도 등에 따라 보상 커패시터의 정확한 용량 조절이 필요하므로 오차를 유발시킬 가능성이 크므로 정밀한 측정이나 자동계측에 적용하기에는 세심한 주위가 요구된다.

참 고 문 헌

- [1] 이복희, "高電壓 大電流工學", 청문각, pp. 223~226, 1993.
- [2] M. Mizuno, M. Hayashi, K. Mitani "Thermal stability and lifetime of the gapless surge arrester.", IEEE Trans. Vol. PAS-100, No. 5, May 1981.
- [3] M. Oyama, I. Ohshima, M. Honda "Life performance of zinc-oxide elements under DC voltage." IEEE Trans. Vol. PAS-101, No. 6, June 1982.
- [4] M. V. Lat "Thermal properties of metal oxide surge arresters". IEEE Trans. Vol. PAS-102, No. 7, July 1983.
- [5] S. Nishiwaki, H. Kimura, T. Satoh "Study of thermal runaway / equivalent prorated model of a surge arrester" IEEE Trans. Vol. PAS-103, No. 2, February 1984.
- [6] 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 Trans. Vol. PWRD-1, No. 2, April 1986.
- [7] 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.5, No 4, November 1990.
- [8] S. Shirakawa, F. Endo, H. Kitajima, S. Kobayashi, K. Kurita and K. Goto, M. Sakai, "Maintenance of surge arrester by a portable arrester leakage current detector", IEEE Trans, Vol.3, No 3, July 1988.
 - [9] L. R. Tumma. " The effects of multiple impulse currents on zinc oxide arresters" A Thesis submitted to the University of Queensland in fulfillment of the requirement of the Degree of Doctor of Philosophy.
 - [10] M. V Lat "Analytical method for performance prediction of metal oxide surge arresters." IEEE Trans. Vol. PAS-104, No. 10, October 1985.
 - [11] S. Tomimaga, Y. Shibuya, Y. Fujiwara, M. Imataki, T. Nitta. "Stability and long term degradation of metal oxide surge arrester", IEEE Trans. Vol. PAS-99, No. 4 July/Aug 1980.

◇ 저자소개 ◇

이 복 희 (李福熙)

1954년 6월 29일생. 1980년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1988~89년 동경대학 생산기술연구소 객원연구원. 1995년 호주 Queensland대학 방문교수. 1999년 Cincinnati대학 방문교수. 현재 인하대 공대 전자전기 컴퓨터공학부 교수. Tel. (032) 860-7398, Fax. (032) 863-5822, e-mail : bhlee@inha.ac.kr

강 성 만 (姜成萬)

1973년 4월 6일생. 1998년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정. Tel. (032) 860-7398, Fax. (032) 863-5822, e-mail : g1983657@inhavision.inha.ac.kr