Journal of the Research Institute of Industrial Technology, Vol 19, 2002

피뢰기의 열화진단 전문가 시스템 개발에 관한 연구

길경석[1] · 김명진[2] · 한주섭[2]

A Study on the Development of an Expert System to Diagnose Lightning Arrester Deterioration

Gyung-Suk Kil[1] · Myung-Jin Kim[2] · Joo-Sup Han[2]

ABSTRACT

This paper describes with an effect of a single- and a quadruple- lightning impulse currents on electrical characteristics of ZnO blocks, and an expert system to diagnose deterioration of arresters.

In this study, an accelerated deterioration test is carried out to deduce the parameters needed for diagnosing arrester deterioration, and leakage current components are measured. Also, wave height distribution of the leakage current with the progress of arrester deterioration is analyzed.

From the experimental results, the wave height distribution of the leakage current showed a conspicuous difference even in an immaterial leakage current increase. The use of wave height distribution of the leakage current in deterioration diagnostic technique makes more accurate diagnosis than the conventional method using only a leakage current value. Finally, the expert system based on the experimental results is developed, and the effectiveness of the system is estimated in a 18[kV] lightning arrester.

1. 서 론

산업구조가 복잡 다변화해짐에 따라 전력설비의 급증으로 전력계통의 높은 신뢰성과 안정성이 절실히 요구되며, 전력계통설비의 신뢰성을 확보하기 위한 대책으로 이상유무를 사전에 예측할 수 있는 시스템의 도입이 필요하다. 현재 전력계통에 사용되는 전력설비의 안정성을 향상시키는 한가지 방안으로 전력용 피뢰기를 사용하고 있으며, 정상운전상태에서의 과도과전압 및 뇌서지 등에 대한 방호 대책으로 사용되고 있다.[1] 최근 전력용 피뢰기는 비선형 저항특성이 우수하고 높은 신뢰성을 가진 ZnO 피뢰기가 주류를 이루고 있다. I-V 비선형 저항특성이 우수한 ZnO 소자를 사용한 ZnO 피뢰기는 갭레스(gapless)화를 가능하게 하여 직렬갭(series gap)을 사용한 재래식 피뢰기와 비교할 때 응답시간이 짧아 보호특성이 향상되고 서지 처리 능력 및 내오손 성능이 우수하다. 또한, 소형 경량화 등의 특징을 가지고 있어 현재 전력계통에 광범위하게 사용되고 있다.

그러나 특고압 배전선로와 같은 전력계통에서는 부하설비의 광범위한 분포로 인한 이상전압의 발생빈도가 증가하여 이 과정에서 피뢰기의 열화가 진전된다.[2]~[3]

1) 한국해양대학교 전기전자공학부
2) 한국해양대학교 대학원 전기공학과

열화가 진전된 피뢰기가 전력계통에 계속 설치되어 사용될 경우 정상운전전압에서 피뢰기의 과열 또는 외부이상전압 침입시 보호동작에서 소자의 파괴가 발생하게 되어 전력계통 전체에 심각한 문제를 일으키게 된다. 따라서 피뢰기의 열화를 진단하는 것이 무엇보다도 중요하다.

본 연구에서는 전력용 피뢰기에 사용되는 여러 가지 ZnO 피뢰기 소자의 기본적인 특성과 열화진전에 따른 피뢰기의 전기적 특성변화를 온라인 상태에서 상시 감시·분석 가능한 열화진단 전문가 시스템의 개발에 관한 내용을 설명하였다.

전력계통에서 사용하는 ZnO 피뢰기 소자에 대하여 정격전압에서 기본 동작특성을 파악하고, 뇌충격전류에 의해 ZnO 소자를 인위적으로 가속열화시켜 초기 특성과 비교하였다. 가속열화시험은 단기간 내에 전력계통의 정상운전상태에서 열화된 피뢰기를 모의하기 위하여 수행하였으며, 실험에서는 ZnO 피뢰기에 관한 국내 시험규격(KSC 4609, ES131-261~283)과 국제 시험규격(IEC60099-4, JEC217)을 적용하였다.[4]~[5]

피뢰기의 열화진전에 따른 전기적 특성변화 즉, 저항분 누설전류의 증가에 의한 전체 누설전류의 변화 및 파고분포의 이동, 피뢰기의 온도 상승에 따른 누설전류의 변화를 온라인 상태에서 열화진단 전문가 시스템을 이용하여 분석하였다.

2. 이 론

2.1 피뢰기의 구조 및 특성

전력용 피뢰기는 단자전압이 이상전압의 침입으로 동작개시전압 이상이 되면 수[μs]이내에 이상전압을 피보호기기의 절연내력 이하로 억제시키고, 이 과정에서 발생한 충격전류는 ZnO 소자를 통하여 대지로 방출된다. 그 후 피뢰기는 이상전압이 소멸하면 즉시 원래의 상태로 회복되며, 배전선로의 정격전압에서도 속류가 흐르지 않고 소자의 누설저항에 의한 수 백[μA]정도의 누설전류만이 흐르게 된다. ZnO 소자의 I-V 특성은 그림 1과 같이 3개의 영역으로 구분하여 설명할 수 있다. 저전계 영역(prebreakdown region)에서 ZnO 소자는 단순히 커패시터와 같은 역할만을 수행하는 영역으로 직렬갭이 없기 때문에 정상운전전압이 직접 ZnO 소자에 가해져 미소한 누설전류만 흐른다. ZnO 소자가 열화되면 I-V 특성은 누설저항이 감소하여 저항분 누설전류가 증가하지만 용량분 누설전류의 변화는 거의 나타나지 않는다. 따라서 동일한 운전전압에서 열화되면 저항분 누설전류의 증가로 인하여 전체 누설전류는 증가한다. 중전계 영역(breakdown region)에서는 전류가 전계의 α승에 비례하고 I-V특성은 식 (1)로 나타난다.

$$I = (V / C)^{\alpha} \tag{1}$$

여기서 V = 전압, C = 정수, α = 비선형 저항상수

대전계 영역(upturn region)은 ZnO 입자의 고유저항이 지배적으로 나타나는 영역으로 I-V 특성이 비례적으로 나타난다. 피뢰기에 있어 대전류가 흐르는 경우 이 영역의 저항치 저감이 중요하다.[6]

전기적 특성을 갖는 ZnO 피뢰기 소자의 전기적 등가모델은 그림 2와 같으며, R_{gb}는 입계층의 전위장벽에 생기는 비선형 저항이며, C_g는 ZnO 입자와 입자 사이의 정전용량을 나타낸 것이다

I_T, I_R, I_C는 전체 누설전류, 저항분 누설전류, 용량분 누설전류를 나타낸 것으로, ZnO 소자의 양단에 교류전압을 인가하면 피뢰기의 등가회로에 의해 저항분 누설전류와 용량분 누설전류가 흐르게 된다. 또한 ZnO 소자의 열화가 진행되면서 누설전류가 증가하는데, 이러한 현상은 ZnO 소자 입계층의 변화에 의해 저항분 누설전류와 용량분 누설전류가 증가하기 때문이다.

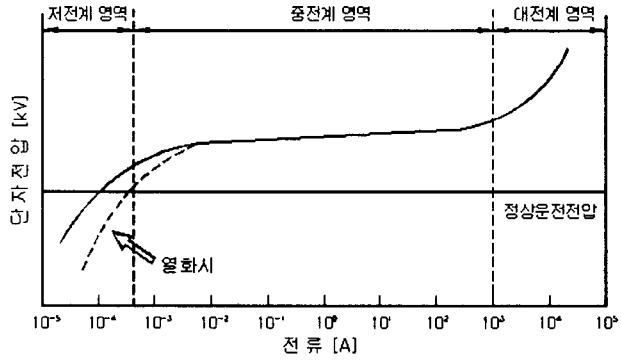


Fig. 1 I-V Characteristics of a ZnO block

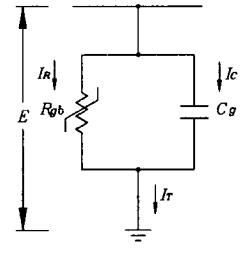


Fig. 2 Electrical equivalent circuit of a ZnO block

2.2 열화진단기술

열화상태를 파악하기 위해서는 정상운전전압에서 피뢰기의 누설전류를 검출하는 것이 중요하다. ZnO 소자가 열화되면 I-V 특성은 저항분 누설전류는 증가하지만 용량분 누설전류는 거의 증가하지 않기 때문에 소자의 열화에 영향을 거의 미치지 않는다 결국 저항분 누설전류가 증가하여 ZnO 소자를 발열시켜 최종적으로 피뢰기 소자의 열폭주, 지락사고 등을 일으키는 요인이 된다. 따라서 저항분 누설전류의 증가를 검출하는 것이 중요하며, 이를 통해 열화진전상태를 확인하여 교체 시기를 결정하는 것이 열화로 인한 전력계통의 사고를 미연에 방지할 수 있는 중요한 요소가 된다.

ZnO 소자에 흐르는 누설전류의 파형 예를 그림 3에 나타내었다 전체 누설전류는 인가되는 전압과 동상인 저항분 누설전류와 위상이 $\pi/2$ 앞선 용량분 누설전류의 합으로 나타나며, 용량분 누설전류가 저항분 누설전류에 비해 훨씬 크게 나타난다.[7]

그림 4는 전압과 누설전류와의 위상관계를 나타낸 것이다. 인가한 전압을 E라고 하면, 전체 누설전류 I_T를 용량분 누설전류 I_C와 저항분 누설전류 I_R의 합으로 나타낼 수 있으며, 인가전압과 전체 누설전류의 위상차를 θ라 하면 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$|I_T| = \sqrt{I_R^2 + I_C^2}, \quad I_R = I_T \cdot \cos\theta, \quad I_C = I_T \cdot \sin\theta \tag{2}$$

그림 4에서 저항분 누설전류가 증가하여 열화되면 전체 누설전류는 I_{T1}에서 I_{T2}로 변화하며, 인가전압과 전체 누설전류의 위상차 θ_1은 저항분 누설전류의 증가로 인하여 θ_2로 변화한다.

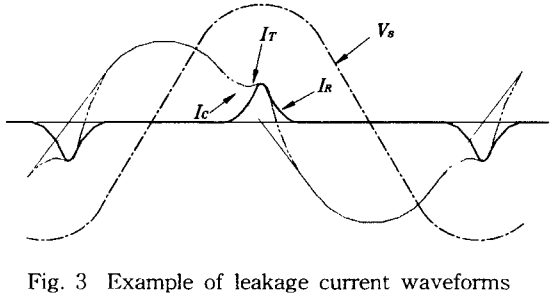


Fig. 3 Example of leakage current waveforms

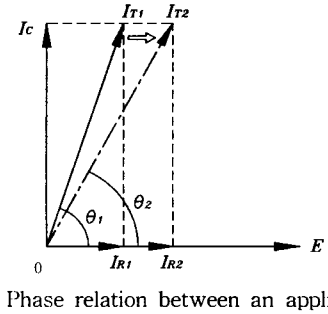


Fig. 4 Phase relation between an applied voltage and leakage current

ZnO 소자의 열화시 정전용량에 의한 용량분 누설전류는 거의 증가하지 않고, 누설저항에 의한 저항분 누설전류가 현저히 증가하는 성질을 이용하여 자기소호방법, 동기정류방법, 제 3조파 검출방법, 와트로스를 측정하는 방법 등의 피뢰기 열화진단기술이 제안되고 있다.[8]

3. 뇌충격전류에 의한 가속열화시험

3.1 실험장치 및 방법

본 논문에서는 전력용 피뢰기의 열화진단에 필요한 전기적 정보를 도출하기 위하여 뇌충격전류에 의한 가속열화 실험을 수행하였다. 실험에는 피뢰기 특성시험에 사용되는 8/20[㎲] 뇌충격전류 발생장치를 이용하여 단일 및 다중의 군단위로 분리하여 적용하였으며, 정격전압 6[kV], 정격전류 5[kA]의 ZnO 소자를 사용하였다.

그림 5는 본 연구에서 구성한 실험장치 및 측정계를 나타내었다. 다중 뇌충격전류 발생장치는 4개의 충전용 콘덴서(100[kV] 0.5[㎌])뱅크와 8 개의 방전구갭(100[mm])으로 구성하여 8/20[㎲], 5[kA] 4회의 표준 뇌충격전류를 발생할 수 있다. 다중 뇌충격전류 발생장치의 뇌격시간 간격은 방전갭의 위치를 조정하여 30[ms]~120[ms]가 되도록 하였으며, 1 분 간격으로 4 중의 뇌충격전류를 발생할 수 있도록 하였다.

다중 뇌충격전류의 실험결과와 비교하기 위한 단일 뇌충격전류 인가실험의 경우, ZnO 소자에 뇌충격전류를 1 분 간격으로 40 회 인가하고 1 시간 이상 충분히 냉각시키는 실험을 반복하였으며, 다중 뇌충격전류의 인가실험에서는 4 중의 뇌충격전류를 10 회 인가하고 1 시간 이상 소자를 냉각시키는 방법을 적용함으로써, 측정시점에서는 단일 및 다중 뇌충격전류로 소자에 인가되는 에너지량이 동일하도록 하였다.

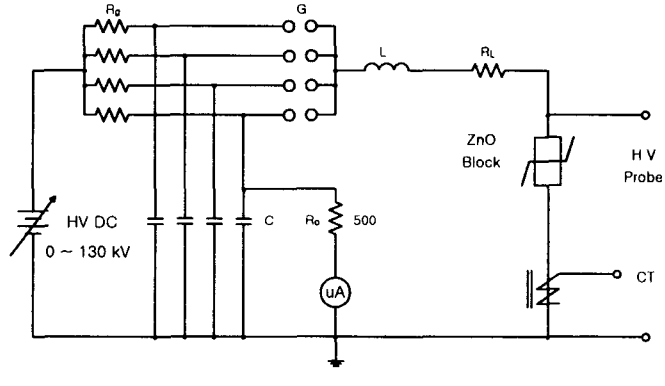
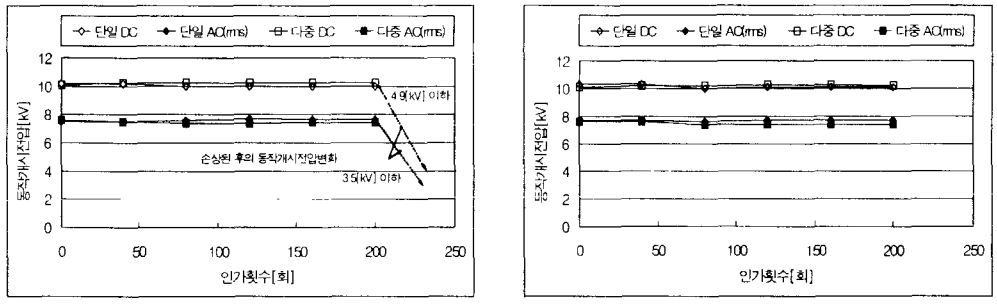


Fig. 5 Configuration of the experimental apparatus and the measurement system.

3.2 동작개시전압 및 누설전류의 변화

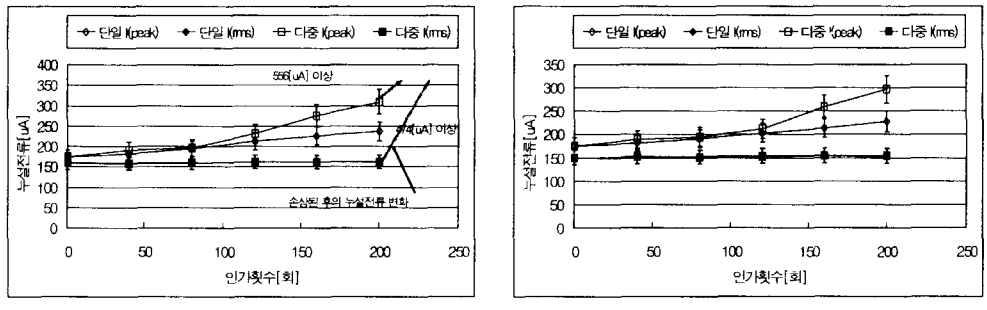
전기적 특성이 동일한 A사와 B사의 ZnO 소자에 단일 뇌충격전류와 다중 뇌충격전류로 동일한 에너지를 인가한 후, 정상운전전압(4.4[kV])에서의 동작개시전압과 누설전류 변화를 비교하였다. ZnO 소자에 대한 기본특성 실험에 있어서 단일 및 다중 뇌충격전압·전류를 총 200회(다중의 경우 50회) 인가한 후 AC, DC에 대한 동작개시전압은 그림 6 (a), (b)와 같이 A, B사 모두 인가전과 비교해서 변화가 거의 없었다. 동작개시전압은 이전의 여러 가지 실험을 통해서도 ZnO 소자의 심각한 국부적인 손상이나 파괴, 또는 뇌충격전류에 의한 핀홀(pin-hall) 생성 등의 경우에는 그림 6 (a)의 점선과 같이 DC는 4.88[kV], AC는 3.5[kV]까지 허용되지만, ZnO 소자가 어느 정도 열화가 진행되어도 그 값의 변화는 거의 없었다.



(a) A 사 (b) B 사

Fig 6 Changes of reference voltage

그림 7 (a)와 (b)는 A사와 B사의 ZnO 소자를 대상으로 단일 뇌충격전류를 1분 간격으로 1회씩 200회를 인가한 경우와 4회의 다중 뇌충격전류를 50회(단일과 비교하면 200회로 동일한 에너지량이 인가된 경우) 인가하였을 때 누설전류를 측정하여 나타낸 것이다 전기적 정격이 같은 2개사의 ZnO 소자에 단일 및 다중 뇌충격전류를 인가하고, 누설전류의 변화를 측정한 결과, 전체 누설전류의 실효값은 변화가 거의 없었다. 최대값은 A사, B사 모두 초기의 누설전류에 비해 단일 및 다중 뇌충격전류 인가에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나 ZnO 소자가 뇌충격전류에 의해 외부적으로 손상을 입거나 파괴가 일어나면 그림 7 (a)의 점선과 같이 실효값에서도 현저한 증가를 나타낸다



(a) A 사 (b) B 사

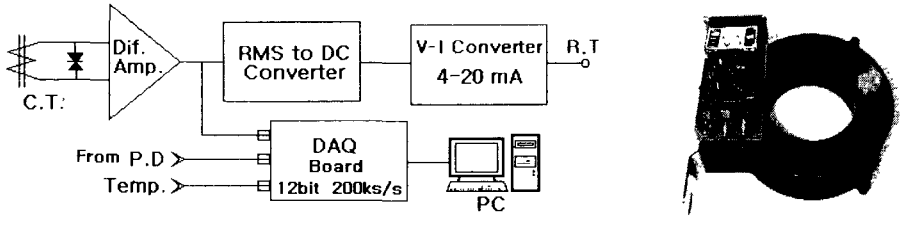
Fig 7 Change of leakage currents

4. 열화진단 전문가 시스템 및 적용평가

4.1 열화진단 전문가 시스템

전력용 피뢰기 열화진단 전문가 시스템은 관통형 고감도 변류기를 사용하여 운전전압에서 피뢰기의 접지측을 전력계통에서 분리하지 않고 누설전류를 검출할 수 있도록 하였다. 또한 정상운전전압에서 피뢰기의 누설전류 및 주위온도를 측정할 수 있도록 하여 운전전압의 변화에 따른 누설전류의 변화를 검출할 수 있도록 하였다 입력된 신호(누설전류, 운전전압, 온도)로부터 피뢰기의 열화에 필요한 정보를 얻기 위해 PC-base 분석 프로그램으로 전체 누설전류 및 저항분 누설전류, 용량분 누설전류의 값을 검출하여 누설전류의 파고분포에 대한 데이터를 얻도록 구성하였다

본 논문에서 설계한 전력용 피뢰기 열화진단 전문가 시스템은 그림 8에 나타낸 바와 같이 고감도 변류기, 차동증폭기(가변이득 60[dB]), 신호변환회로, 입·출력장치(DAQ Board 12bit, 200[ks/s], 8ch), 및 PC-base 분석 프로그램으로 구성되어 있다.



(a) 시스템의 구성도 (b) 누설전류 검출장치

Fig 8 Configuration of the expert system

열화진단 전문가 시스템은 각종의 알고리즘(고역통과필터, 저역통과필터, 주파수 스펙트럼 분석, 파고선별기)을 적용하여, 검출된 신호(누설전류, 운전전압, 주위온도)로부터 피뢰기 열화진단에 필요한 정보를 얻을 수 있도록 구성하였고, 세부사항은 다음과 같다.

①전체 누설전류 및 제 3조파 누설전류의 주파수 스펙트럼, 실효값, 최대값, 평균값

②전원전압의 주파수 스펙트럼과 실효값

③전원전압과 전체 누설전류의 위상차

④전체 누설전류의 파고분포

⑤주위온도

4.2 적용 실험

4.2.1 정상운전전압에서의 누설전류 검출

그림 9는 6[kV], 5[kA] 정격의 ZnO 소자에 본 시스템을 적용하여 측정한 결과를 나타낸 것으로 온라인 상에서 실시간으로 ZnO 소자에 흐르는 누설전류와 전압 및 온도를 측정하였다 그림 9에서 111[㎂]의 저항분 누설전류와 154.7[㎂]의 용량분 누설전류를 나타내고 있다. 이 저항분 누설전류의 값은 전체 누설전류 크기에 비해 미소한 값으로 나타나는 것을 알 수 있으므로 전체 누설전류의 대부분은 용량분 누설전류의 값임을 확인할 수 있다. 화면의 오른쪽에 전체 누설전류와 제 3조파 누설전류에 대한 파형과 주파수 스펙트럼을 측정하여 나타내었다.

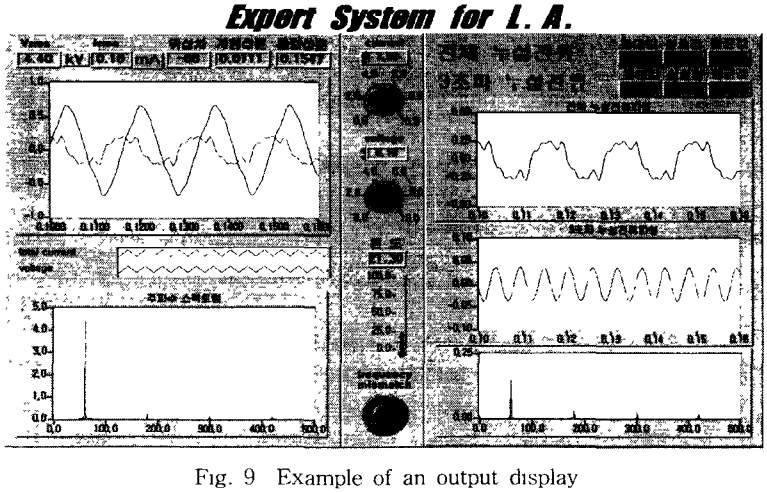


Fig. 9 Example of an output display

그림 10은 18[kV], 5[kA] 정격의 전력용 피뢰기에 본 시스템을 적용하여 측정한 결과를 나타낸 것이다 그림에서 195[㎂]의 저항분 누설전류와 225.7[㎂]의 용량분 누설전류를 나타내고 있다 저항분

누설전류의 값은 전체 누설전류 크기의 86[%]에 해당하는 값으로, 전체 여러 연구 데이터에 의한 보고자료와 같이 전체 누설전류의 대부분은 용량분 누설전류의 값임을 알 수 있다 화면의 오른쪽에 전체 누설전류와 제 3조파 누설전류에 대한 파형과 주파수 스펙트럼을 측정하여 나타내었다

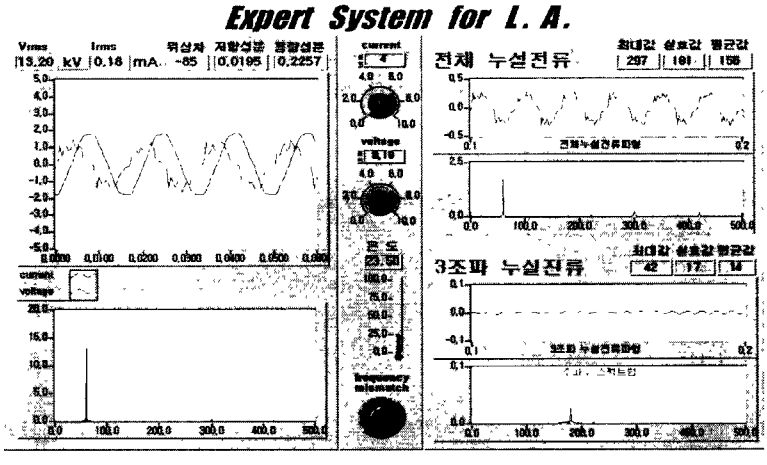


Fig. 10 Example of an output display

4.2.2 온도 증가에 따른 누설전류 파고분포의 변화

ZnO 소자는 배전선로에 운전전압이 가해진 상태에서도 계절에 따라 온도가 변화하고, 특히 피뢰기의 보호동작횟수가 증가하게 되면 소자가 가열되어 온도가 상승하게 되므로 온도변화에 대한 누설전류의 파고분포 특성을 조사하였다 ZnO 소자를 가열장치 내에 설치하고 44[kV]의 운전전압을 인가한 후 20[℃]에서 100[℃]까지 가열하여 설정온도에서 30분간 유지한 후 측정하였다 그림 11에 나타낸 바와 같이 주위 온도 상승에 의한 누설전류의 파고분포를 나타낸 것으로 온도가 상승함에 따라 파고값이 증가하고 파고분포의 변화가 있음을 알 수 있었다

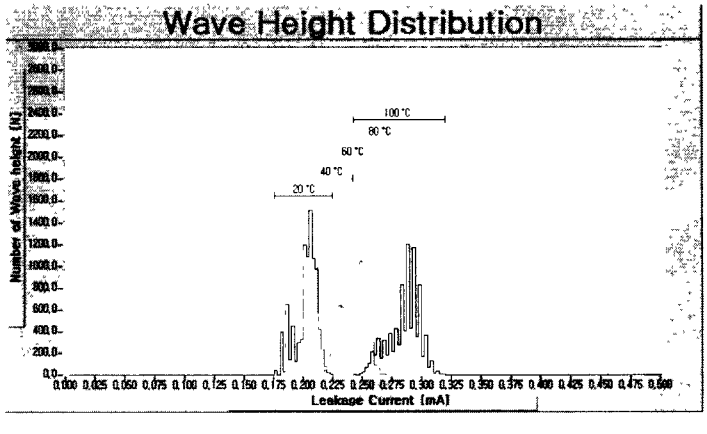


Fig 11 Wave height distribution of the total leakage current to ambient temperature

4.2.3 전체 누설전류의 파고분포 분석

그림 12는 ZnO 피뢰기 소자(6[kV], 5[kA])의 정상운전전압에서 전체 누설전류의 파고분포를 나타낸 것으로 x축은 파고값의 크기, y축은 파고의 개수를 나타낸 것이다 실험에는 신품 소자와 계속적으로

뇌충격전류를 인가하여 핀홀(pin-hall)이 발생한 것의 2가지 시료를 대상으로 정상운전전압에서 전체 누설전류의 파고값을 1분 동안 측정한 것을 나타낸 것이다 그림 12에 나타난 바와 같이 열화진전에 따라 파고값이 증가함은 물론 파고분포에 현저한 변화가 있음을 알 수 있다 신품의 경우에는 약간의 차이는 있지만 파고의 중심은 225[㎂] 정도였으며, 200[㎂]에서 250[㎂]까지의 파고들이 분포하였다 핀홀이 발생한 소자의 경우 파고의 중심은 750[㎂]정도이고, 680[㎂]에서 800[㎂]까지의 파고들이 넓게 분포하였다. 또한, 50[㎂]에서 80[㎂]까지의 부분에서도 파고들이 나타나는데 이것은 핀홀이 발생한 소자의 일부 입자 또는 입계만 변형이 발생하였기 때문에 변형이 발생하지 않은 균일한 부분의 파고가 나타난 것으로 생각된다

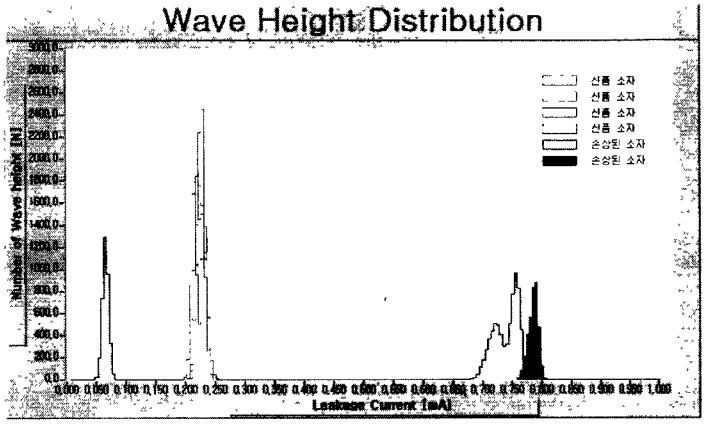


Fig 12 Wave height distribution of the total leakage current (ZnO blocks)

그림 13은 3가지 종류의 배전용 피뢰기(18[kV], 5[kA])를 대상으로 정상운전전압에서 전체 누설전류의 파고값을 1분 동안 측정한 것을 나타낸 것이다 A사 및 B사는 피뢰기 신품을 C사는 배전선로에서 1년 6개월 정도 사용한 피뢰기를 대상으로 측정한 것이다 C사의 제품은 A·B사와는 많은 차이를 가지고 있으며, 파고의 중심은 400[㎂]이고, 450[㎂] 주위의 파고들이 많고 200[㎂]에서 600[㎂]까지의 파고들이 넓게 분포하고 있다 ZnO 소자에서도 확인한 것처럼 열화진전에 따라 파고값이 증가함은 물론 파고분포에 현저한 변화가 있음을 알 수 있다

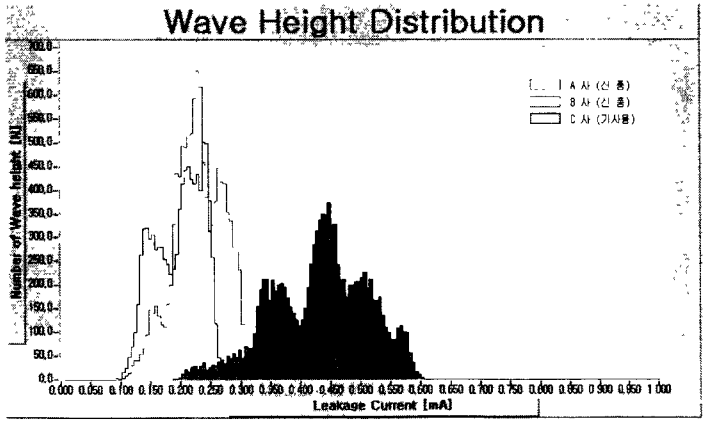


Fig 13 Wave height distribution of the total leakage current (ZnO lightning arresters)

5. 결 론

본 논문에서는 전력계통에서 과도전압 보호장치로 사용되는 ZnO 피뢰기의 열화진단 전문가 시스템 개발을 목적으로, 뇌충격전류에 의한 가속열화 실험을 수행하고 ZnO 소자의 열화진전기구를 파악하였다. 실험결과로부터 누설전류의 파고분포가 열화판단에 중요한 파라미터임을 확인하고 이를 이용한 새로운 방식의 열화진단 전문가 시스템을 제안하였으며, 연구결과를 요약하면 다음과 같다

1. 열화진단에 필요한 전기적 정보를 도출하기 위하여 뇌충격전류에 의한 가속열화실험을 수행하고, 열화판단에 누설전류의 실효값, 최대값 및 파고분포가 중요한 파라미터임을 이론적 실험적으로 확인할 수 있었다.
2. ZnO 소자는 열화진전에 따라 누설전류의 실효값과 최대값이 증가하며, 특히 최대값의 증가가 현저하게 나타났다. 이들 누설전류의 파고를 분석함으로써 미소한 열화진전 상태도 분석하는 것이 가능하였다.
3. 실험결과로부터 새로운 방식의 피뢰기 열화진단 시스템을 개발하였으며, 본 시스템은 고감도 변류기, 60[dB] 이득의 증폭회로 및 12bit, 200[ks/s]의 데이터 취득장치로 구성되며, 이들의 제어와 분석은 LabView 프로그램을 사용하여 개인용 컴퓨터에서 운용되도록 설계하였다.
4. 제안한 시스템은 전체누설전류의 실효값, 평균값, 최대값 및 이들의 파고분포, 인가전압과 전류의 위상차를 측정할 수 있으며, 전압 전류의 위상차로부터 저항분 누설전류의 분석도 가능하다.
5. 본 연구에서는 제안한 열화진단 전문가 시스템을 시제작하고 피뢰기 소자, 배전용 피뢰기에 적용성을 평가하였다.

참고문헌

[1] 橋本信雄, "雷とサージ 発生のしくみから被害防止まで", 電気書院, pp. 79～114, 1995.

[2] 金方直弘, 斉藤宗敬, 大木秀人, 中井仁志, "避雷器の漏れ電流検出の開発", 日本電気学会電力・エルギー部門大会, pp. 848～849, 1994.

[3] 岡藤伸夫, 西岡陸一, 前川 洋, 祐木昭彦, "酸化亜鉛形避雷器の漏れ電 流検出方式の提案", 日本電気学会電力・エネルギー部門大会, pp. 850～851, 1994.

[4] 한국전력공사, "전력용 피뢰기", ES 131-261, 1984.

[5] The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., "IEEE Std. for Metal-Oxide Surge Arresters for AC power Circuits", ANSI/IEEE C62.11, 1987.

[6] 酸化亜鉛形避雷器の特性評価試験法調査専門委員会, 酸化亜鉛形避雷器 の特性と価試験法, 電気学会, 第474号, pp10～14, 1993

[7] 馬場則男 外, "酸化亜鉛素子の雷インパルス電流印加による特性変化の 検討", 日本電気学会 放電・高電圧 合同 研究会資料, ED-95-186, HV-95-57, 1995

[8] 石崎義弘 外, "避雷器の外部診断技術", 電気設備の予測保全, pp. 45～ 50, 1987.