

# 누설전류의 파고분포 분석에 의한 새로운 피뢰기 진단기술 및 장치

論 文  
52C-12-4

## New Diagnostic Technique and Device for Lightning Arresters by Analyzing the Wave Height Distribution of Leakage Currents

吉 暻 碩\* · 韓 柱 燮\*\* · 宋 在 鏞\*\*\* · 趙 漢 九<sup>§</sup> · 韓 文 燮<sup>¶</sup>  
(Gyung-Suk Kil · Ju-Seop Han · Jae-Young Song · Han-Goo Cho · Moon-Seob Han)

**Abstract** - Lightning arresters are deteriorated by repetition of protective operation against overvoltages or impulse currents in environments of its use. If a deteriorated arrester is left in power lines, it can lead to an accident such as a line to ground fault even in a normal system. Therefore, it is necessary to eliminate the deteriorated arrester in advance by checking the soundness of arresters on a regular basis, and to ensure the reliability of power systems by preventing accidents.

Various deterioration diagnostic techniques and devices are suggested, and most of which measure leakage current components as an indicator of arrester ageing. However, the techniques based on the magnitude of leakage current measure simply RMS or peak value of leakage current components and do not provide detailed information needed in the diagnosis.

In this study, we found that the wave height distributions of the total leakage currents are remarkably changed or a new wave height are produced with the progress of arrester deterioration. To propose a new technique for the diagnosis, we designed a leakage current detection unit and an analysis program which can measure leakage current magnitudes and analyze wave height distributions.

From the experimental results, we confirmed that the proposed technique by analyzing the wave height distribution can simply diagnose the mode of defects such as a partial damage and an existence of punctures in arresters as well as deterioration of arresters.

**Key Words** : lightning arresters, overvoltages, deterioration diagnostic techniques, wave height distribution, leakage current detection unit, mode of defects, punctures

### 1. 서 론

피뢰기는 전력계통에서 내·외부 과전압에 대해 경제적, 기술적으로 가장 효과적인 보호 장치로 현재는 전압-전류의 비선형 저항특성이 우수한 산화아연 (ZnO)형 피뢰기가 주류를 이루고 있다. 과거 탄화규소 (SiC)형 피뢰기를 사용할 때에 비해 과전압에 대한 보호 능력이 현저히 증가하였으며, 전력계통에서 피뢰기의 열화로 인한 1선 지락사고도 현저히 감소하였다. 그러나 이와 같은 우수한 특성의 피뢰기도 제조사의 결함이나 설치 환경에 따른 흡습, 이상전압에 대해 반복되는 보호동작으로 열화가 진전되면서, 전력계통에서 발생하는 1선 지락사고의 10 ~ 30 [%] 정도는 피뢰기가 원인 이 되고 있다[1-4].

이러한 배경에서 국내는 물론 국외에서도 피뢰기의 열화

정도를 상시 관측하여 수명을 예측하거나 열화된 피뢰기를 사전에 교체함으로써, 피뢰기에 의한 사고를 예방하고 중전 기기의 성능을 유지하여 동작 신뢰성 확보를 위한 연구들이 활발히 진행되고 있다[4-12]. 현재까지 개발 또는 상용화된 피뢰기 열화진단기술에는 피뢰기의 제한전압, 공칭방전전류, 손실전력, 누설전류, 정전용량 등을 측정하는 것이 있다. 그 중에서도 피뢰기의 전체 누설전류 또는 제3조파 누설전류를 진단 파라미터로 사용하는 방법은 전력계통에 설치되어 있는 피뢰기를 온라인 상태에서 열화진단이 가능하므로 가장 널리 이용되고 있다[7,10-12]. 그러나 누설전류를 기준으로 열화를 진단하는 방법은 전체 누설전류의 최대값이나 실효 값, 또는 전체 누설전류의 제3조파 성분의 최대값을 측정하여 열화기준으로 평가하는 것으로 정확도가 떨어지고 미소한 열화진전은 분석하기가 어려운 점이 있었다.

새로운 열화진단기술을 개발하기 위하여 본 논문에서는 전력계통에서 장기간 사용되어 열화된 피뢰기와 신품 피뢰 기의 비교실험을 통하여 누설전류의 크기와 파고분포변화를 분석하였다. 실험 결과로부터 피뢰기는 열화가 진전됨에 따라 전체 누설전류의 파고분포가 현저히 변화하거나 새로운 파고분포가 형성되는 것을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에 서는 새로운 열화진단기술을 제안하고자 누설전류 검출장치를 설계·제작하고 누설전류 분석용 프로그램과 누설전류의

\* 正 會 員 : 韓 國 海 洋 大 電 氣 電 子 工 學 部 副 教 授 · 工 博

\*\* 正 會 員 : 韓 國 海 洋 大 產 業 技 術 研 究 所 研 究 員 · 工 博

\*\*\* 正 會 員 : 韓 國 海 洋 大 電 氣 電 子 工 學 部 博 士 課 程 修 了

¶ 正 會 員 : 韓 國 電 氣 研 究 員 責 任 研 究 員 · 工 博

§ 正 會 員 : 韓 國 鐵 道 技 術 研 究 員 先 任 研 究 員

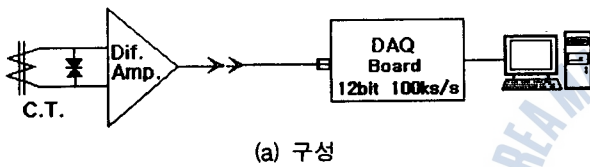
接受日字: 2003年 4月 4日

最終完了: 2003年 10月 18日

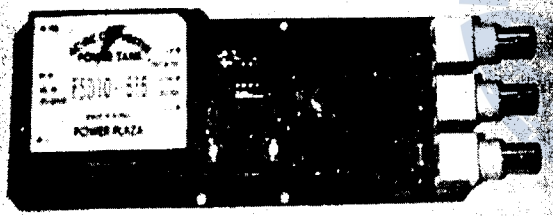
파고분석 알고리즘을 설계하였다[12]. 제안된 기술 및 장치는 변·배전용 피뢰기의 온라인 열화진단과 72kV급 GIS변전용 피뢰설비의 원격감시장치에 적용하고 있으며, 지속적으로 누설전류의 크기와 파고분포 분석을 통하여 정확도 향상과 보안을 계속할 것이다.

## 2. 누설전류 검출장치

정상운전전압에서 피뢰기의 누설전류를 검출하기 위하여 그림 1과 같이 클램프형 변류기, 최대 이득 60 [dB]의 차동 증폭기로 구성되는 누설전류 검출장치를 제작하였다. 누설전류 검출장치의 감도는 1 [mV/μA]로 최소 8 [μA]부터 최대 5 [mA]의 전류를 측정할 수 있으며, 피측정대상인 피뢰기의 정격에 따라 차동증폭기의 2단계 이득조절로 감도조정이 가능하다. 송·배전용 및 배전용 피뢰기의 누설전류는 제조사에 따라 차이가 있지만 신품의 경우 150 ~ 300 [μA], 열화가 진전함에 따라 600 [μA] ~ 2 [mA] 정도임을 고려하면 피뢰기 열화진단에 충분한 감도와 측정범위를 갖는다.



(a) 구성



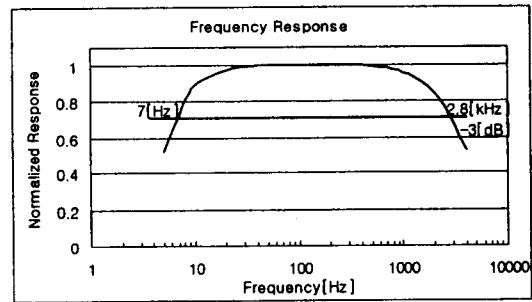
(b) 사진

그림 1 누설전류 검출장치

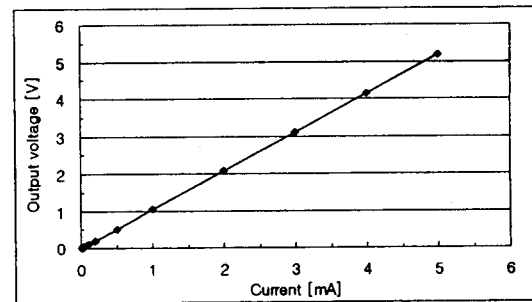
Fig. 1 Leakage current detection unit

또한 전력계통전압에는 다수의 고조파가 함유되어 있으며, 이들 고조파 전압의 함유도에 따라 피뢰기의 누설전류도 변화하기 때문에 누설전류 검출장치의 주파수 대역이 검토되어야 한다[13].

본 논문에서는 고감도 영상변류기에 접지선을 판통시키고 함수발생기에 의해 일정전류가 흐르도록 설정한 상태에서 인가전원의 주파수를 5 [Hz]에서 5 [kHz]까지 가변시키면서 차동증폭기 출력전압의 측정으로부터 선형성과 주파수 특성을 분석하였다. 그림 2에 나타난 바와 같이 본 누설전류 검출장치의 주파수 대역은 7 [Hz] ~ 2.8 [kHz] (-3 [dB])이었으며, 8 [μA] ~ 5 [mA]까지 입출력의 선형성이 유지되므로 피뢰기의 정상운전전압에서 피뢰기의 누설전류를 제7조파 성분까지 왜곡이나 감쇄없이 검출할 수 있는 특성이다.



(a) 주파수 특성



(b) 입력-출력 특성

그림 2 누설전류 검출장치 특성

Fig. 2 Characteristics of the leakage current detection unit

## 3. 누설전류의 파고 및 분석프로그램

피뢰기의 전체 누설전류 ( $I_T$ )는 그림 3과 같이 전원전압 ( $V_s$ )에 90° 앞선 용량분 누설전류 ( $I_C$ )와 동상의 저항분 누설전류 ( $I_R$ )의 합으로 나타난다. 열화가 진전되어도 용량분 누설전류는 크게 변화하지 않으나[5,10], ZnO 입계면에서 전위장벽의 저하로 저항분 누설전류는 현저히 증가하는 현상을 나타내게 된다[14]. 따라서 피뢰기의 열화를 직접적으로 진단하기 위해서는 저항분 누설전류의 변화를 측정하는 것이 필요하다. 운전 중 피뢰기의 저항분 누설전류를 측정하는 것은 검출회로의 구성이 대단히 복잡하고 적용상에 해결해야 할 문제가 있어, 현재는 저항분 누설전류의 변화에 의한 전체 누설전류 중에서 제3조파 성분의 변화를 검출하는 것으로 대신하는 방법이 일반화되어 있다[8-10]. 그러나 제3조파 누설전류 측정에 의한 열화진단은 필터의 특성과 전원 고조파에 의해 파고값이 수시로 변동하여 측정편차가 크게 되는 단점이 있다.

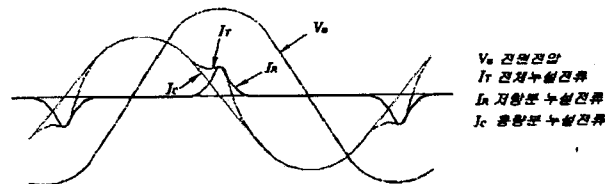
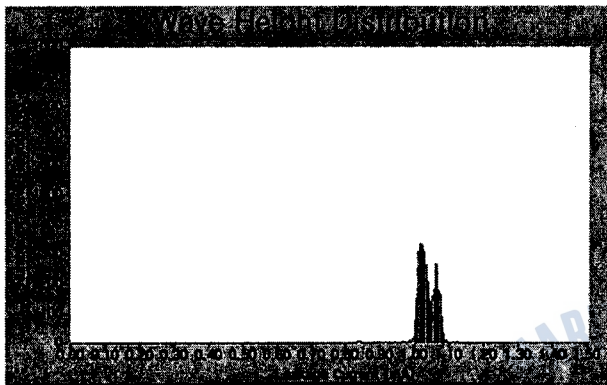


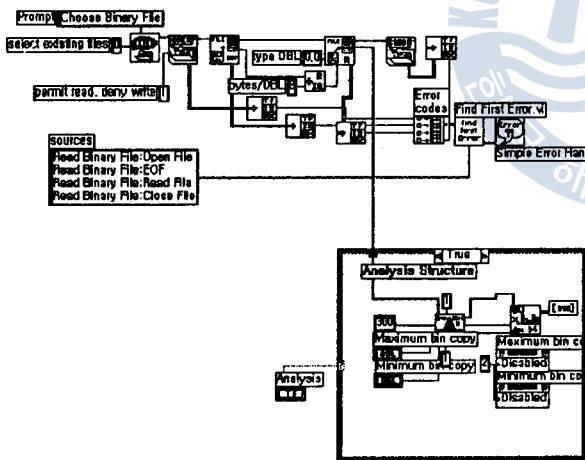
그림 3 누설전류 파형의 예

Fig. 3 Typical leakage current waveforms

본 논문에서는 피뢰기 열화진단에 있어 측정과 분석이 간단한 누설전류 파고분석법을 제안하였다. 그림 3에서 설명한 바와 같이 피뢰기의 용량분 누설전류에 저항분 누설전류가 중첩되면 전체 누설전류의 왜곡이 발생하며 새로운 파고가 생성되거나 파고값이 현저하게 변화하는 특성을 나타낸다. 따라서 전체 누설전류의 파형은 열화상태에 따라 다양하게 변화하므로 누설전류의 파고분석으로부터 열화상태를 기존의 방법보다 고정도로 진단할 수 있다. 제안한 전체 누설전류의 파고분석에 의한 피뢰기 열화진단은 미소한 열화진전에서도 파고분포의 현저한 차이를 확인할 수 있으므로 측정이 간편하고 열화진전 정도를 쉽게 판단할 수 있다[12].



(a) 파고분포 분석 예



(b) 프로그램의 구성

그림 4 파고분석 프로그램

Fig. 4 Wave height analysis program

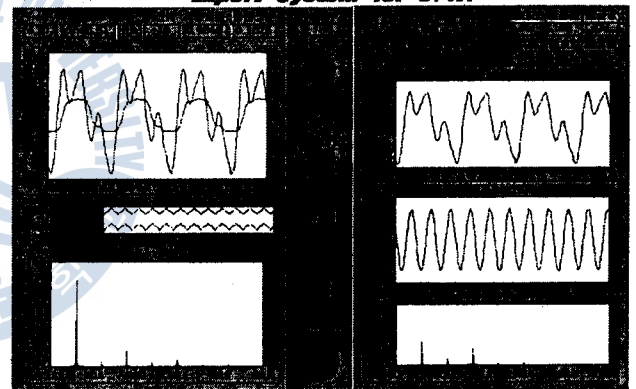
운전 중인 피뢰기의 누설전류를 측정하고 검출된 파형으로부터 피뢰기의 열화정도를 평가할 수 있도록 그래픽 프로그램(LabView Ver. 6.01, National Instrument)을 사용하여 그림 4와 같은 파고 분석 프로그램을 설계하였다. 누설전류 검출장치의 출력은 200 [kS/s]의 데이터 취득장치의 A/D 입력에 연결되고, 설정조건에 따라 누설전류를 측정 후 개인용 컴퓨터에서 분석된다.

#### 4. 파고분포 분석에 의한 열화진단기술

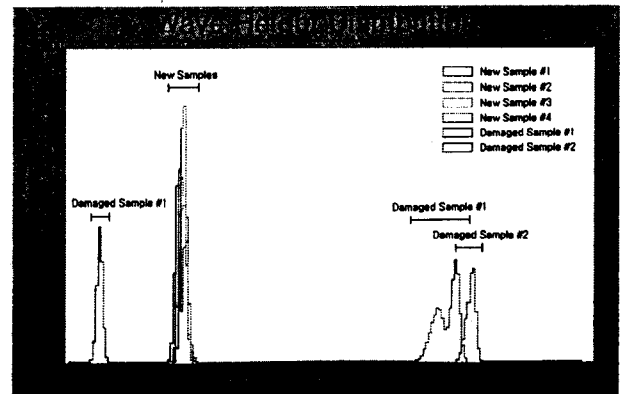
누설전류의 파고분포 분석을 통한 열화진단기술은 ZnO 소자, 배전용 피뢰기 및 GIS용 피뢰설비를 대상으로 적용실험이 수행되었다.

고조파가 포함된 정현파 신호는 고조파에 의한 영향으로 순수 정현파 신호와는 달리 여러 개의 파고가 분포하게 된다. 그림 5(a)는 핀홀(pin hole)이 발생한 ZnO 소자에 정격 운전전압 인가시 측정된 누설전류 파형의 예를 나타낸 것이다. 교류 운전전압이 피뢰기에 인가되면 피뢰기를 흐르는 전체 누설전류의 파형은 열화상태에 따라 다양한 형태로 나타날 수 있으며, 본 예에서와 같이 심각한 국부적 손상이나 핀홀 등이 발생하여 많은 열화가 진전되면 저항분 누설전류의 증가로 전체 누설전류 파형이 그림 3에서 설명한 바와 달리 비대칭 형태로 나타나게 된다. 그림 5(b)는 신품 ZnO 소자와 뇌충격전류의 인가로 핀홀이 발생한 소자의 파고분포를 비교하여 나타낸 것이다. 신품소자의 경우에는 파고의 중심이 225 [μA] 정도이고, 파고의 분포는 200 [μA]에서 250 [μA]까지 대체적으로 균일한 파고분포를 갖는다. 열화가 진전되어 핀홀이 발생한 소자의 경우에는 파고의 중심은

#### Expert System for L. A.



(a) 누설전류 파형 예(핀홀 발생 소자)



(b) 누설전류의 파고분포

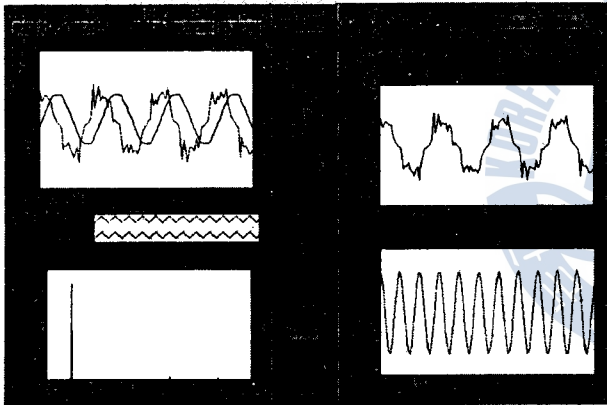
그림 5 누설전류 파형과 파고분포 예(소자)

Fig. 5 Leakage current waveforms and their wave height distributions of total leakage current (blocks)

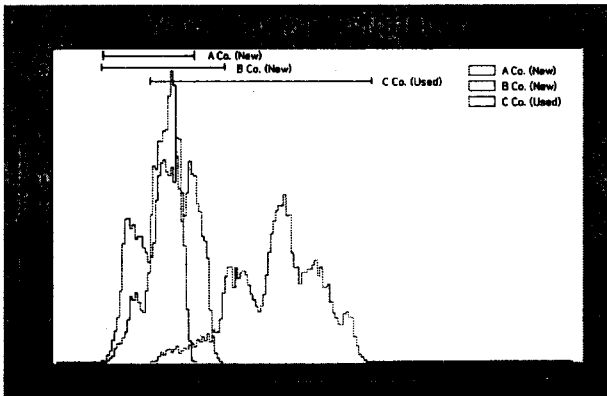
750 [μA] 정도이며, 680 [μA]에서 800 [μA]까지 파고가 넓게 분포하였다. 또한 50 [μA]에서 80 [μA] 범위에서도 파고 분포가 검출되는데 이것은 편흔이 발생한 소자의 일부입자 또는 입계의 변형이 일어난 것으로 판단된다.

그림 6은 배전용 피뢰기(정격 18 [kV], 5 [kA]) 신품 2종 (A 및 B사)과 배전선로에서 1년 6개월 정도 사용한 피뢰기 (C사)를 1종을 대상으로 정상운전전압(13.2 [kV])에서 측정 한 전체 누설전류의 파형 예와 전체 누설전류의 파고분포를 1분 동안 측정하여 나타낸 것이다. 그림 6(a)는 기사용 피뢰기의 누설전류 파형 예로 전체 누설전류의 실효값은 322 [μA], 최대값은 552 [μA]로 관측되었다. 또한 그림 6(b)의 A사와 B사의 신품 피뢰기의 파고분포는 100 [μA]에서 300 [μA]의 범위에서 파고가 나타나며, 200 [μA]를 전후한 범위에 많은 파고가 분포한다. 기사용 피뢰기의 파고분포는 신품과 현저한 차이를 나타내고 있으며, 파고의 중심은 400 [μA]이고, 450 [μA] 주위의 파고들이 많고 200 [μA]에서 600 [μA]까지의 파고들이 넓게 분포하고 있다. 이는 ZnO 소자에서도 확인한 것처럼 열화진전에 따라 파고값이 증가함은 물론 파고분포에도 현저한 변화가 나타남을 알 수 있다.

**Expert System for L. A.**



(a) 누설전류 파형 예

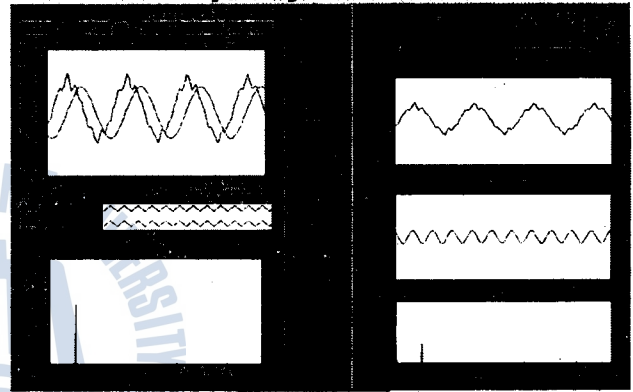


(b) 누설전류의 파고분포

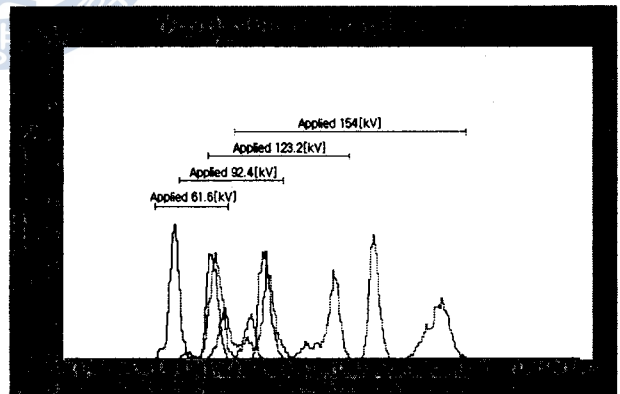
그림 6 누설전류 파형과 파고분포 예 (피뢰기)  
Fig. 6 Leakage current waveforms and their wave height distributions of total leakage current (L.A.)

그림 7은 170kV급 GIS용 피뢰설비의 운전전압을 40 [%], 60 [%], 80 [%], 100 [%]로 상승시키면서 1분 동안 측정 한 전체 누설전류의 파고분포를 나타낸 것이다. 운전전압의 40 [%]에서 많은 파고는 430 [μA]와 580 [μA]이며, 60 [%]에서는 600 [μA]와 780 [μA]로 나타났다. 또한 80 [%]에서는 630 [μA]와 790 [μA] 및 1,050 [μA], 정격운전전압에서는 730 [μA], 1,460 [μA]와 1,220 [μA]에서 나타났으며, 전체적으로 파고는 670 [μA]에서 1,560 [μA]까지 넓게 분포하였다. ZnO 소자에서도 확인한 것처럼 운전전압을 인가함에 따라 누설전류의 파고값이 증가함은 물론 파고분포에 현저한 변화를 나타내고 있다. 이와 같이 전체 누설전류의 파고분포는 피뢰기의 열화진전에 따라 파고가 큰 쪽으로 이동하거나 새로운 파고분포를 발생시키며, 파고의 분포 범위도 넓어지는 경향을 나타내고 있다.

**Expert System for L. A.**



(a) 누설전류 파형 예



(b) 누설전류의 파고분포

그림 7 누설전류 파형과 파고분포 예 (GIS용 피뢰설비)  
Fig. 7 Leakage current waveforms and their wave height distributions of total leakage current (GIS arrester)

결론적으로 피뢰기의 열화진전에 따라 전체 누설전류의 파고분포에 변화가 나타나므로 파고분포를 분석함으로써 피뢰기의 열화상태를 판단하는 것이 가능하다고 생각된다.

기존의 피뢰기 진단기술과 비교할 때[5-10], 전체 누설전류 또는 제3조파 누설전류의 최대값 측정의 경우는 피크검출방식 (peck detection method)으로 측정기간 중에 검출된



참 고 문 헌

누설전류의 최대값을 표시하는 것으로 피뢰기의 열화형태와는 무관하게 최대값만을 표시한다. 또한 전체 누설전류의 최대값은 제3조파 누설전류와 마찬가지로 전원고조파에 의해서도 영향을 받으나 기존 기술에서는 이를 고려하지 않으므로 측정오차가 발생할 수 있다. 전체 누설전류의 실효값 측정기술은 측정기간중의 실효값을 표시하므로 열화시 저항분 누설전류의 증가에 의한 실효값 누설전류의 변화량이 적기 때문에 어느 정도 진전된 열화상태에서는 인지할 만한 변화를 주지 못한다.

그러나 본 연구에서 제안한 파고분석에 의한 피뢰기 진단기술은 전체 누설전류의 파형에 있어 변곡점을 검출하여 그 크기의 분포를 나타내는 것으로, 파형에 미소한 변곡점도 검출하고 열화상태에 따라 파고분포가 다르게 나타나므로 기존 방식보다 많은 정보를 가지고 피뢰기의 열화를 진단할 수 있어 보다 진전된 기술이라고 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 누설전류의 파고분포 분석에 의한 새로운 방식의 피뢰기 열화진단기술을 제안하였으며, 누설전류의 크기만으로 진단하는 기존의 진단기술에 비해 좀 더 정확하게 피뢰기의 성능을 진단할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구를 통해 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 본 연구에서는 신품 소자, 경년 열화된 소자 및 뇌충격전류에 의한 가속열화 실험과정에서 핀홀 발생과 같은 국부적 손상이 발생한 소자 등 여러 가지 피뢰기 및 소자들 이용하여 열화상태에 따른 전체 누설전류의 파고분포를 분석하였다. 실험결과로부터 피뢰기 및 소자는 열화진전에 따라 전체 누설전류의 파고분포가 변화함을 알 수 있었으며, 본 특성을 이용하여 피뢰기의 열화진단이 가능함을 확인하였다.
2. 전체 누설전류의 파고분포 분석에 의한 기술을 적용하기 위하여 클램프형 영상변류기와 60 [dB] 이득의 고감도 증폭기로 구성되는 누설전류 검출장치와 분석프로그램을 설계·제작하였다. 기본특성 실험으로부터 누설전류 검출장치는 주파수 대역 7 [Hz] ~ 2.8 [kHz], 감도 1 [mV/ $\mu$ A]이었으며, 10 [ $\mu$ A] ~ 5 [mA]범위의 누설전류를 왜곡없이 검출할 수 있었다.
3. 제안한 누설전류 파고분포 분석에 의한 열화진단기술을 ZnO 소자(6 [kV], 5 [kA]), 18kV급 배전용 피뢰기 및 170kV급 GIS용 피뢰설비에서 적용실험을 수행한 결과, 누설전류의 크기만으로 열화를 진단하는 기존 진단기술에 비해 많은 정보를 적용함으로써 피뢰기의 국부적 손상이나 전반적 열화, 핀홀의 발생 등을 구분할 수 있을 정도로 열화진단이 가능하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원 주관 철도기술 연구개발 사업에 의하여 수행되었으며, 관계부처에 감사드립니다.

- [1] J.J.Burke, "Application of mov gapped arrester on non effectively grounded distribution systems", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.6, No.2, pp.794~800, 1991.
- [2] 今井康友 外, "架空地線直撃雷に對する配電用避雷器の保護効果", 日本電氣學會論文誌, B111卷, 6号, pp.619~627, 1991.
- [3] J.R.Ribeiro, M.E.McCallum, "An application of metal oxide arresters in the elimination of need for closing resistors in EHV breakers", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.4, No.1, pp.282~291, 1989.
- [4] 길경석, 한주섭, "다중뇌충격전류에 의한 산화아연형 피뢰기 소자의 전기적 특성 변화", 대한전기학회 논문지, 제49C권, 12호, pp.685~690, 2000.
- [5] S.Shirakawa et al., "Maintenance of surge arrester by portable arrester leakage current detector", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.3, No.3, pp.998~1003, 1988.
- [6] J.Lundquist et al., "New method for measurement of the resistive leakage currents of metal-oxide surge arrester in service", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.5, No.4, pp.1811~1822, 1990.
- [7] 宇治田克 外, "酸化亞鉛形避雷器用漏れ電流檢出器", 三菱電機技報, Vol.55, No.3, pp.228~231, 1981.
- [8] 石辺信治, "酸化亞鉛形避雷器の劣化診斷テクニク", 電氣計算, Vol.44, No.3, pp.56~60, 1987.
- [9] 石崎義弘 外, "避雷器の外部診斷技術", OHM, Vol.74, No.4, pp.45~50, 1987.
- [10] 江藤伸夫 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.
- [11] Gyung-Suk Kil et al., "Electrical Characteristic Changes of ZnO Blocks by a Lightning Impulse Current and an Expert System to Diagnose Deterioration of Lightning Arresters", Proceedings of ICEE 2001, Vol.2, pp.1281~1284, 2001.
- [12] 길경석 외, "뇌충격전류에 의한 산화아연형 피뢰기 소자의 전기적 특성과 피뢰기 열화진단 전문가 시스템", 대한전기학회 논문지, 제51C권, 4호, pp.152~157, 2002.
- [13] Gyung-Suk Kil, Ju-Seop Han, Jong-Heuk Lee, "Influence of Harmonics in Power System Voltage on Arresters Deterioration Diagnostics", Proceedings of 2002 Joint Conference of ACED & K-J Symposium on ED and HVE, pp.151~154, 2002.
- [14] T.K.Gupta, "Application of zinc oxide varistors", Journal of the American Ceramic Society, Vol.73, No.7, pp.1817~1840, 1990.

저 자 소 개



**길경석 (吉 曠 碩)**

1962년 6월 30일생. 1984년 인하대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1996~현재 한국해양대학교 전기전자공학부 부교수. 2003년 2월~현재 영국 Cardiff University 방문교수.  
Tel : 051-410-4414, Fax : 051-403-1127  
E-mail : kilgs@hhu.ac.kr



**조한구 (趙 漢 九)**

1959년 4월 14일생. 1984년 성균관대학교 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 전기기기 기술사. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1987년~현재 한국전기연구원 책임연구원 팀장.  
Tel : 055-280-1670, Fax : 055-280-1673  
E-mail : hgcho@keri.re.kr



**한주섭 (韓 柱 燮)**

1972년 1월 13일생. 1997년 부경대학교 제어계측공학과 졸업. 1999년 한국해양대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 2003년~현재 한국해양대학교 산업기술연구소 연구원.  
Tel : 051-410-4893, Fax : 051-403-1127  
E-mail : jshan@bada.hhu.ac.kr



**한문섭 (韓 文 燮)**

1964년 11월 26일 생. 1987년 인하대학교 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년~1995년 국방과학연구소 연구원. 1995년~현재 한국철도기술연구원 전력계통연구그룹 선임연구원.  
Tel : 031-460-5420, Fax : 031-460-5459  
E-mail : mshan@krri.re.kr



**송재용 (宋 在 鏞)**

1975년 1월 28일생. 1997년 한국해양대학교 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료.  
Tel : 051-410-4893, Fax : 051-403-1127  
E-mail : hvlab@magicn.com