

누설전류의 제3고조파 분석에 의한 ZnO소자의 열화진단기술

이복희, 강성만
인하대학교 공과대학 전기공학과

A Technique of Deterioration Diagnosis for ZnO Element by Analyzing the 3rd order Harmonics of Leakage Current

Bok-Hee Lee, Sung-Man Kang
Dept. of Electrical Engineering, Inha University

Abstract - This paper describes the technique of deterioration diagnosis for ZnO element.

Due to the non-linear resistance of ZnO block, the total leakage current contains harmonics when arrester deteriorated. The most significant harmonics is the 3rd order component. So, it can be used as an indicator of the arrester condition.

An iron core, which has a very high relative permeability, is used for increasing detection sensitivity and the 3th order harmonics of leakage current was detected by band-pass circuit. And we have verified the reliability and performance of the sensing device through several laboratory tests.

1. 서 론

피뢰기는 전력계통에 침입하는 뇌서지, 개폐서지, 일시적 과전압등의 전기적 에너지를 흡수하여 전송선로 및 발·변전기를 보호하는 중요한 전력기기 중의 하나이다. 1980년대 중반 이후부터 gap type의 SiC피뢰기에 비해 비선형성이 우수한 gapless type의 ZnO피뢰기가 연구·개발되어 발·변전소 및 전송선로에 광범위하게 채택되고 있는 추세이다. 그러나 시간이 경과됨에 따라 피뢰기의 온도 및 제한전압이 상승되는 특성을 보이며 이로 인해 열화되어 보호장치로서의 역할을 충분히 발휘하지 못하고 사고를 유발시키고 있다.^{(1)~(3)} 따라서 건전한 전력계통의 보호를 위해서는 고장을 미연에 예측할 수 있는 피뢰기 열화진단기술의 확립이 필수적이다.

피뢰기의 열화판정에는 기준전압, 방전전류전압, MCOV (Maximum Continuous Operating Voltage)에서의 전력측정, 절연저항측정 등이 있으며, 그중에서 누설전류의 제 3고조파 분석을 통한 열화판정이 가능하다. ZnO피뢰기는 gapless구조로 되어 있어 계통전원에 의한 미소 누설전류가 상시 흐르기 때문에 시간의 경과에 따라 저항분 누설전류가 증가하게 된다. ZnO의 비선형 저항특성으로 인하여, 고조파 전류의 진폭이 누설전류의 저항성 성분과 더불어 증가하므로 고조파 전류는 ZnO피뢰기의 열화 정도를 판정할 수 있는 지시기(indicator)로서 이용될 수 있다.

본 연구에서는 수 십[μ A]정도의 미소 누설전류를 감지하기 위하여 고투자를 철심을 이용한 고감도 변류기를 구현하였고, 대역통과필터를 통해 누설전류의 제 3고조파 성분을 측정하였다. 전원계통전압에 포함된 고조파에 의한 잡음레벨이 최소가 되도록 검출부를 설계하였다. 검출기의 성능 검증을 위하여 주파수 특성 및 응답감도를 조사하였고, 실제 피뢰소자에 시험전압을 인가하여 온도변화에 따른 누설전류 변화를 통해 전 누설전류 및 제 3고조파 전류를 정확히 검출할 수 있음을 보였으며, 활용성에 대하여 검토·고찰하였다.

2. 측정이론 및 설계

2-1. 자기적분형 변류기

감쇠정수 (L/R)값이 피측정(누설)전류의 주기에 비해 매우 큰 경우 출력저항 R_0 를 적분저항으로 하는 전류측정계(CT)의 등가회로는 그림 1과 같으며, 출력저항 R_0 와 CT자체의 인덕턴스에 의해 자기적분형으로 동작한다.

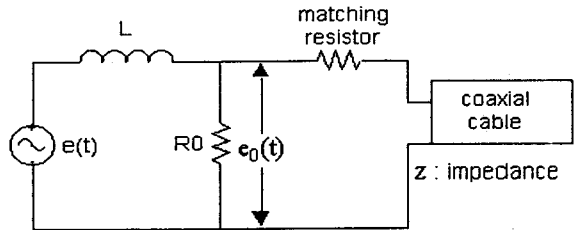


그림 1. 자기적분형 CT의 등가회로
Fig. 1. Equivalent circuit of the self-integrated CT

출력저항 앞단의 전압 $e_0(t)$ 와 피측정 전류 $i(t)$ 와의 관계는 다음과 같은 회로방정식으로 표현할 수 있다.

$$i(t) = -\frac{L(R_0 + Z)}{M R_0 Z} \cdot e_0(t) [A] \text{----- (1)}$$

- M : 상호인덕턴스 (1차, 2차코일)
- L : 자기인덕턴스
- Z : 케이블의 특성임피던스

식(1)에서 CT자체의 인덕턴스가 출력저항에 비하여 상대적으로 매우 크거나 피측정 전류가 고주파인 경우 CT 출력은 피측정(누설)전류에 비례한다. 본 연구에서는 코일의 권수 200[turn]이고, 직경32[mm], 두께2.5[mm], 비투자를 40,000인 페라이트 코어를 사용하였다.

2-2. 검출부 회로

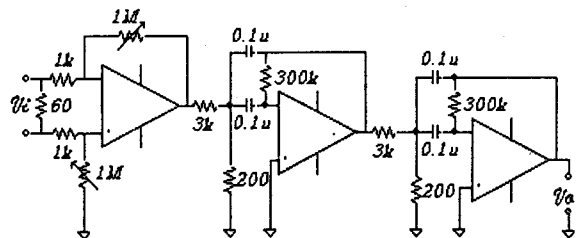


그림 2. 검출 회로
Fig. 2. detection Circuit

CT의 출력전압을 높이기 위해서는 출력저항을 크게 하면 되지만 반면에 검출감도의 선형성이 저하된다. 실험결과, 실신호의 누설전류를 검출하기 위한 출력저항으로는 60(Ω)이 양호한 특성을 나타내었으며, 이는 식(1)의 조건을 만족한다. 그림2는 검출회로를 나타낸 것이며, CT 출력신호를 검출하기 위한 출력저항과 미소전압신호의 증폭과 동시에 잡음신호를 최소화하기 위한 차동증폭기로 구성되어 있다. 그리고 제 3고조파 성분만을 검출하기 위한 능동성 대역통과필터와 수동성 RC필터를 병용하였다. 차동증폭기 출력단에서의 실신호의 전체 누설전류 파형의 검출과 필터 출력단에서의 제 3고조파 전류파형의 관측은 저장기능을 가진 디지털 오실로스코프(DSO)를 이용하였다.

3. 검출장치의 구성

전체 누설전류 및 제3고조파 전류를 측정하기 위한 검출장치의 개요도를 그림 3에 나타내었다.

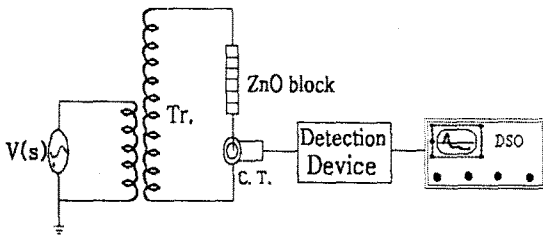


그림 3. 검출장치의 개요도
Fig. 3. Schematic diagram of detection device

실험장치의 구성은 전압조정장치, 전압계, 고압변압기(100V:15,000V), ZnO소자 측정용 전극, CT, DSO(TDS 644B), Audio Generator등과 ZnO소자의 온도 특성을 알아보기 위한 소자 가열용으로 전기로를 사용하였다. 그림 4는 측정장비와 피뢰기의 ZnO소자 시험용으로 만들어진 전극의 사진을 나타낸 것이다.

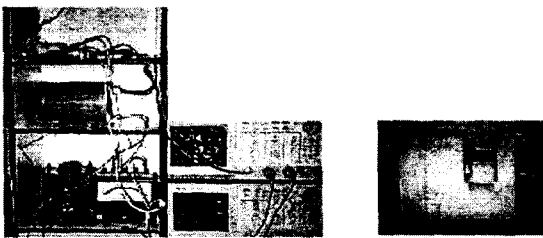


그림 4. 측정장치 및 측정용 전극의 사진
Fig. 4. Photograph of measurement device and electrode for ZnO block test

4. 실험결과 및 고찰

4-1. 검출기의 기본특성

(1) 주파수 특성

그림 5는 전류가 일정할 때, 검출장치의 주파수-전압특성을 나타낸 것이다.

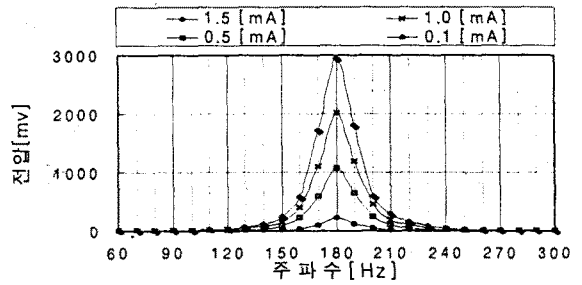


그림 5. 검출장치의 주파수 특성
Fig. 5. Frequency characteristics of detection Device

180[Hz]을 중심주파수로 하고 첨예도(sharpness)가 18, 대역폭이 10[Hz]인 주파수 특성을 나타내었다. 누설전류의 값이 증가할수록 검출장치의 첨예도는 증가하였으며, 확실한 제 3고조파 성분의 검출이 가능함을 알 수 있다.

(2) 응답 감도

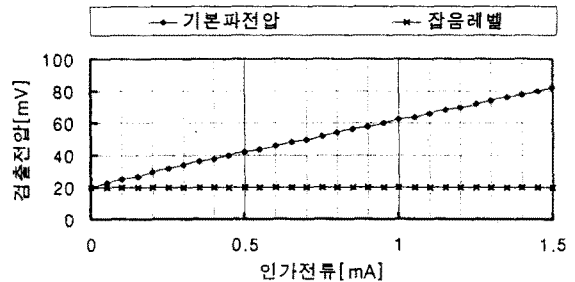


그림 6. 상용주파수에 대한 응답감도
Fig. 6. Response sensitivity to commercial frequency

그림 6은 주파수를 60[Hz]로 일정하게 하고, 인가 전류를 0~1.5[mA]까지 0.1[mA] 간격으로 서서히 변화시켰을 때 검출장치의 응답감도를 나타낸 것이다. 증폭기의 증폭도(약 70[dB])를 고려했을 때 매우 미소한 응답을 보임을 알 수 있다. CT의 입력 누설전류가 0일 때에도 약간의 잡음 전압이 나타났으며, 이것은 상용 전원의 기본주파수에 의한 영향으로 추정된다.

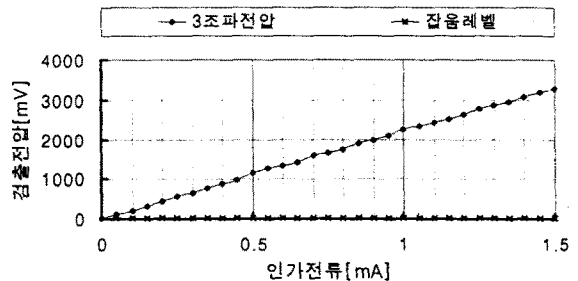


그림 7. 제 3고조파의 응답감도
Fig. 7. Response sensitivity for the 3rd order Harmonics

제 3고조파 성분의 인가전류에 대한 응답감도를 그림 7에 나타내었다. 기본파에 비해 선형성이 우수하며, 응답감도(sensitivity)가 크게 향상되었음을 알 수 있다.

4-2. 실증실험 결과

(1) ZnO소자에 흐르는 누설전류

산화아연피뢰기는 커패시터와 비선형 저항의 병렬회로로 동작될 수 있으며, 피뢰기에 흐르는 전체 누설전류는 용량성 전류와 저항성 전류로 이루어져 있다. 시간의 경과에 따라 산화아연 소자의 비선형 특성에 의해 전력손실에 관련된 저항분 전류가 증가하게 되고, 피뢰기 내부의 분자운동을 촉진시켜 내부온도가 상승하게 되어 피뢰기의 수명이 단축된다. 즉, 저항분 전류의 증가는 피뢰기 열화를 나타내는 지표가 된다. 특히, 누설전류중에서 저항분 전류가 증가하면 제 3고조파 전류가 증가하는 것으로 알려져 있다.^[2]

그림 8에는 ZnO소자에 60[Hz]전압을 인가시켰을 때 전체 누설전류와 그의 제3고조파 성분만을 검출한 전류의 파형을 나타내었다. ZnO소자 자체의 유전특성 때문에 기본파의 대부분은 충전전류(용량성)이다. 물론, 피뢰기소자인 ZnO가 열화되면 기본파 누설전류도 증가하지만, 이것만으로 열화의 정도를 판정하는 것은 정확도가 대단히 떨어지게 된다. 요컨대, 열화에 의한 누설전류의 저항성 성분은 저항성 성분에 비하여 매우 적기 때문이다. 인가전압이 증가함에 따라 누설전류 파형의 왜곡이 두드러지고 제 3고조파 전류가 현저히 증가함을 보여주고 있다. 따라서 누설전류의 제3고조파 성분을 분석하므로써 우수한 정확도로 열화판정이 가능함을 알 수 있다.

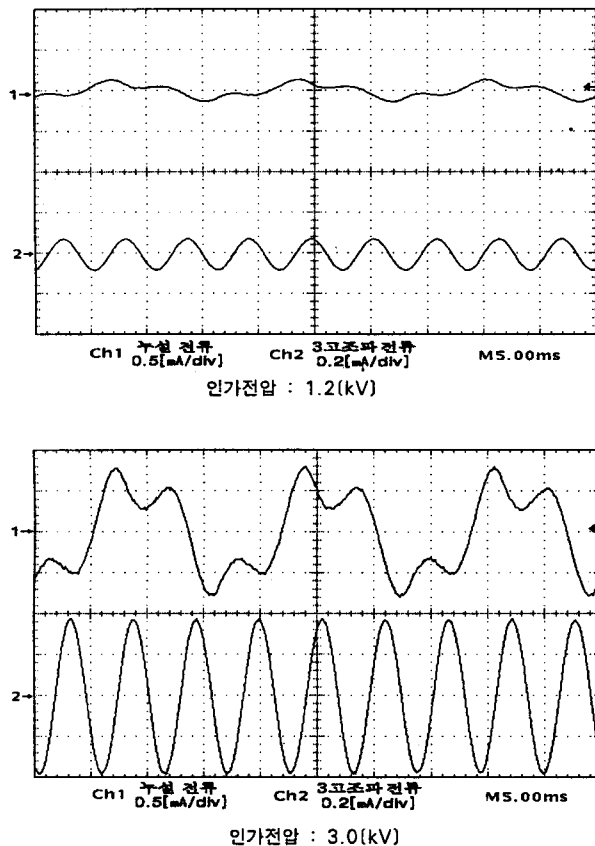


그림 8. 인가전압에 따른 누설전류와 3고조파 전류의 파형
Fig. 8. Waveforms of the Leakage Current and 3rd order Harmonic current as applied Voltage

(2) 온도변화에 따른 특성변화

정격전압 3[kV], 5[kA]이고, 직경 33[mm], 두께 29[mm]인 배전용 피뢰기에 사용하는 ZnO소자에 상용전압을 인가했을 때 미소 누설전류 영역에서의 저항분전류의 온도의존성을 그림 9에 나타내었다. 데이터는 일정 온도의 전기로에 ZnO소자를 60분 동안 유지시킨 후 각 전압에서 1분 동안 측정된 누설전류 실패치의 평균값으로 나타내었다.

결과에서 알 수 있듯이 소자의 온도가 높아질수록, 3고조파 성분의 누설전류가 증가하였다. 또한, 전압의 인가시간이 증가할수록 저항분 전류가 증가하였다.

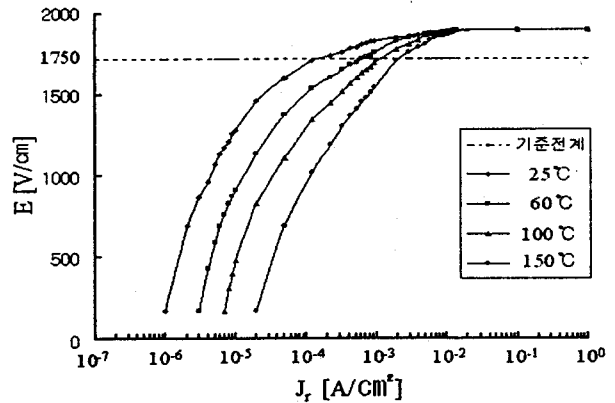


그림 9. 온도에 따른 저항분 누설전류의 특성
Fig. 9. Characteristic of resistive current as a temperature

5. 결 론

본 논문에서는 피뢰기용으로 사용되는 ZnO소자의 전 누설전류와 열화의 지표가 되는 3고조파 전류를 분석하여 열화의 유무를 판정할 수 있는 검출장치를 설계 제작하고, 검증실험을 통하여 신뢰성을 확인하였다. 그러나 실제 현장에 설치되어 사용중인 피뢰기의 열화진단에 있어서는 실험실에서 나타나지 않았던 온도의 변화, 상용전원으로부터 발생하는 고조파의 영향 등을 고려해야 할 것이다. 그리고 무엇보다도 피뢰기의 열화판정에 기준이 되는 한계값의 확립을 위해서는 보다 많은 데이터의 확보가 우선되어야 할 것이며, 실증적 연구가 필요하므로 향후 계속적인 연구가 요구된다.

[참 고 문 헌]

- [1] S. Tominaga, Y. Shibuya, Y. Fujiwara, M. Imataki, T. Nitta, "Stability and long term degradation of Metal Oxide surge arrester", IEEE Trans. on power Apparatus and System, Vol. PAS-99, No. 4 July/Aug 1980
- [2] 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 Transactions on Power Delivery, Vol.3, No 3, July 1988
- [3] 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 Transactions on Power Delivery, Vol.5, No 4, November 1990
- [4] 이복희, "高電壓 大電流工學", 청문각, pp. 150~186, 1993