

누설전류측정에 의한 피뢰기 열화진단기술에 있어 전원고조파의 영향

Influence of System Voltage Harmonics on Arrester Deterioration Diagnostic Techniques by Leakage Current Measurement

길경석, 한주섭

한국해양대학교 전기전자공학부

Gyung-Suk Kil, Joo-Sup Han

Dept. of Electrical and Electronics Engineering, Korea Maritime University

Abstract

This paper describes an influence of system voltage harmonics on arrester deterioration diagnostic techniques based on leakage current measurement because the resistive current is composed of two components caused by nonlinear characteristics of arrester and by system voltage harmonics.

Resistive leakage currents of arresters, which can be evaluated by the third harmonic component of total leakage currents, increase with its deterioration progress. In this paper, we developed a PSpice model for ZnO arrester to simulate the harmonics' effect described above. In simulation, pure sinusoidal voltage and the 3rd harmonic voltage are applied to the model, and the leakage current changes are compared. The simulation results showed that the magnitudes of resistive leakage current depend not only on the phase of system voltage harmonics but also on the magnitude of it.

Key words : voltage harmonics, deterioration diagnostic techniques, resistive leakage currents

1. 서 론

전력계통에서 내·외부 과전압에 의해 선로 및 중전기기의 절연이 위협받고 있으며, 이에 대해 경제적, 기술적으로 가장 효과적인 대책은 전압-전류의 비선형 저항특성이 우수한 산화아연(ZnO)형 피뢰기를 기기 또는 선로에 병렬로 설치하는 것이다. 그러나 피뢰기도 제조시의 결함이나 사용환경에 따른 흡습, 이상전압에 대한 반복되는 보호동작으로 열화가 진행된다. 열화된 피뢰기가 전력계통에 장시간 설치되어 있으면 정상운전전압에서 누설전류에 의해 피뢰기 소자가 과열되거나, 열폭주에 도달하여 피뢰기의 폭발로 인한 지락사고로 진전하여 2차적인 인적·물적 사고를 유발시킨다. 따라서 피뢰기의 열화 정도를 상시 관측하여 열화된 피뢰기를 사전에 계통으로부터 제거함으로써, 피뢰기에 의한 사고를 예방

하여 중전기기의 성능을 유지하고 동작 신뢰성을 확보할 필요가 있다.

피뢰기 열화진단기술에는 피뢰기의 제한전압, 방전전류, 손실전력, 누설전류, 정전용량 등을 측정하는 것이 있다. 그 중에서도 전력계통에 설치되어 있는 피뢰기의 누설전류를 측정하여 열화상태를 분석하는 방법이 주류를 이루고 있다. 그러나 누설전류를 기준으로 열화를 진단하는 방법은 단순히 전체 누설전류 또는 누설전류의 제 3조파 성분의 최대값 또는 실효값을 측정하는 것으로 열화진단에 필요한 정보를 충분히 제공하지 못하고 있으며, 또한 전원선에 포함된 고조파의 크기와 위상에 따라 피뢰기 열화는 무관하게 누설전류의 크기가 달라지게 된다. 따라서 본 논문에서는 누설전류에 의한 피뢰기 열화진단 기술에 있어 전원고조파의 영향을 분석·고찰하였다.

2. 누설전류에 의한 열화 진단 기술

그림 1은 피뢰기의 전기적 등가모델을 나타낸 것으로, I_c 와 I_r 는 각각 용량분 누설전류와 전체 누설전류를 나타내며, I_r 은 ZnO 소자의 입계층간에 형성된 Schottky 장벽의 변화에 의한 저항분 누설전류로 그 값이 변하는 것을 나타낸 것이다. 피뢰기에 교류운전전압이 인가되면 그림 2와 같이 인가전압에 $\pi/2$ 앞선 큰 용량분 누설전류와 동상의 미소 저항분 누설전류가 흐르게 된다.

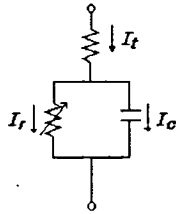


그림 1 ZnO 피뢰기의 전기적 등가모델
Fig. 1 Equivalent model of ZnO Arresters

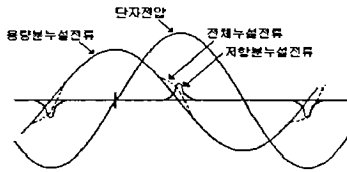


그림 2 누설전류파형 예
Fig. 2 Typical waveform of leakage currents

피뢰기의 열화는 상용주파수 교류과전압과 뇌충격 전류에 의한 것으로 대별되며, 이러한 원인으로 열화가 진전되면서 저항분 누설전류가 증가하게 되므로 피뢰기 열화진단에 이들 누설전류의 크기나 파고 분포의 변화를 응용한다.

3. 열화진단에 있어 전원고조파의 영향

피뢰기 누설전류는 피뢰기 양단에 정상운전전압이 인가된 상태에서 흐르는 누설전류의 크기를 측정하는 것으로, 인가전압이 순수한 전원주파수만 포함하고 있으면 문제가 없지만, 전원에는 다수의 고조파가 포함되기 마련이다. 그러므로 전원의 고조파 함유율이 크게 되면 누설전류에 의한 열화진단에 영향을 주게 된다.

인가전압이 순수한 정현파에서 측정된 전체 누설전류 i_t 는 용량분 누설전류 i_c 와 저항분 누설전류 i_r 로 구성된다. 열화진전에 따라 저항분 누설전류의 크기가 증가하며, 열화진단의 지표로 사용된다. 그러나 인가전압에 식(1)과 같이 고조파를 포함한다고 가정한다.

$$v = \sqrt{2}v_1 \sin \omega t + \sqrt{2}v_n \sin(n\omega t + \varphi) \quad (1)$$

여기서, n 은 3, 5, ..., φ 는 위상차이다.

이 때 전체 누설전류는 i_t 는

$$i_t = i_c + i_r \quad (2)$$

이 되고, i_c 는 기본파 전압과 고조파 전압에 의해

$$i_c = i_{c1} + i_{cn} \quad (3)$$

이 되고, 저항분 누설전류는 피뢰기 소자 자체의 비선형특성에 의한 제 3고조파 성분과, 인가전원의 고조파에 의한 제 3고조파 성분을 포함하게 된다. 따라서 저항분 누설전류는

$$i_r = i_{r1} + i_{r3}' + i_{r3}'' \quad (4)$$

로 되어 인가전압의 고조파 함유율에 따라 측정값이 달라지게 된다.

본 논문에서는 누설전류의 열화진단기술에 있어 인가전압에 포함된 고조파의 영향을 분석하기 위하여 정격 6kV, 5kA인 ZnO 소자의 비선형 저항특성을 가진 PSpice 모델 식 (5)를 설계하였다. 여기에 순수 정현파 및 기본파의 제 3고조파 성분만의 함유를 증가에 따른 전체 누설전류 및 저항분 누설전류의 크기를 PSpice 프로그램에 의한 시뮬레이션으로 분석하였다.

$$\log(V_{var}) = a_0 + a_1 \log(i) + a_2 \exp\{-\log(i)\} + a_3 \exp\{\log(i)\} \quad (5)$$

그림 3에는 시뮬레이션에 이용한 회로를 나타내었다. 피뢰기 모델링에 있어서는 인가전원의 고조파 함유율에 따른 저항분 누설전류의 변화를 분석하기 위하여 커패시터 성분은 없는 것으로 하고 피뢰기 모델과 병렬로 이에 상응하는 커패시터(C_p)를 연결하였다. 그러므로 피뢰기 양단에 전원이 인가되면 피뢰기에는 저항분 전류만이 흐르게 된다.

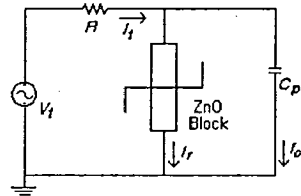


그림 3 시뮬레이션 회로도
Fig. 3 Circuit for simulation

그림 4에는 정상운전전압에서 피뢰기 소자의 인가전압과 누설전류 파형 및 저항분 누설전류의 고조파 분석한 것을 나타내었다. 이미 잘 알려진 바와 같이 전체 누설전류는 인가전압보다 90° 앞선 용량분 누설전류와 인가전압과 동상인 저항분 누설전류로 표현할 수 있다. 인가 전압이 순수한 정현파만을 가지더라도 ZnO 소자의 비선형 저항특성에 따르는 저항분 누설전류에는 60Hz의 기본성분 이외에 제 3고조파 이상의 성분들이 존재하는 것을 확인할 수 있다.

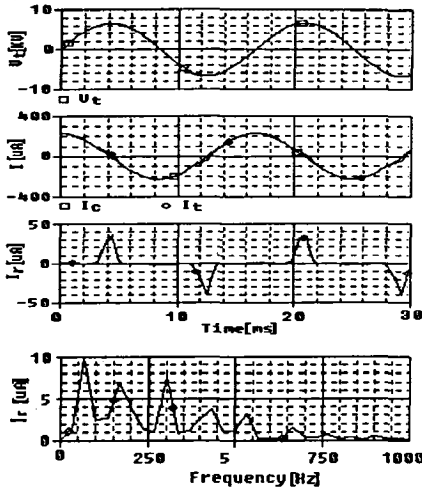
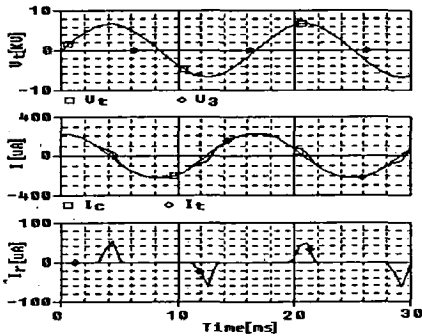
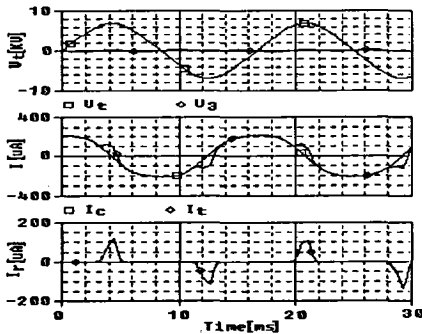


그림 4 인가전압과 누설전류 파형 예(순수정현파)
Fig. 4 Typical waveforms of applied voltages and leakage currents(pure sinusoidal)

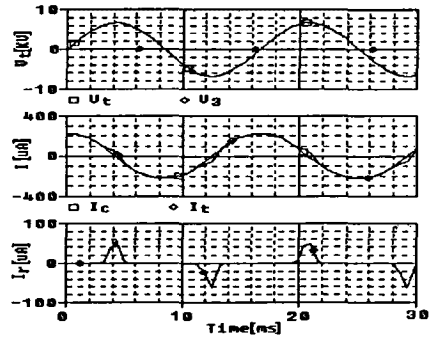
그림 5는 인가전압 v_1 에 포함된 제 3고조파 v_3 의 함유율을 기본과 v_1 의 위상 0° 및 180° 에서 0.5%, 1%, 2%, 3%로 증가시켰을 때, 누설전류의 변화를 나타낸 것이다.



(a) 180° , 1%



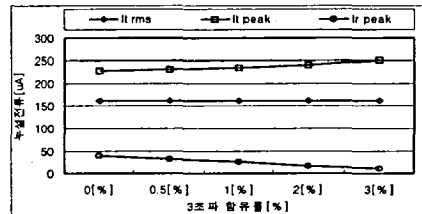
(b) 180° , 3%



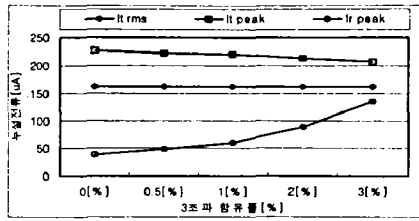
(c) 0° , 3%

그림 5 인가전압과 누설전류 파형의 예
Fig. 5 Typical waveforms of applied voltages and leakage currents(contains harmonic)

그림 5에는 위상 0° 일 때 제 3고조파가 3% 포함되어 있을 때, 위상 180° 에서 제 3고조파가 1%, 3% 포함되어 있는 경우에 대하여만 나타내었다. 순수 정현파만 포함되어 있을 때에는 누설전류가 다르게 나타나는데, 먼저 위상 0° 에서의 경우를 보면 전체 인가전압의 최대값에서는 제 3고조파는 반대 부호의 최대값을 가지게 되므로 함유율이 커지면 커질수록 전체 인가전압의 최대값은 감소하게 되지만, 실효값은 거의 변하지 않는다. 그러나 이 경우의 전체 누설전류는 제 3고조파의 전압 v_3 으로 인하여 점차 최대값은 증가하지만, 저항분 누설전류는 전체 인가전압 v_1 의 최대값의 감소로 인하여 저항분 누설전류의 최대값은 증가하지 않고 오히려 감소하게 되는 결과를 가진다. 이 때의 저항분 누설전류의 주파수 스펙트럼 분석 결과를 보면, 순수한 정현파만 있는 경우와는 다른 값을 가지게 되므로 실제의 피뢰기 소자에 대해서는 이에 대한 보정이 필요할 것으로 생각된다. 그러나 위상 180° 에서 제 3고조파 전압을 포함하게 되면 전체 인가전압 v_1 의 최대값은 증가하고, 실효값은 거의 변화하지 않는다. 0° 위상에서의 결과와는 반대의 결과인 전체 누설전류의 최대값은 점차 감소하고, 저항분 누설전류는 증가하게 된다.



(a) 0° 에서 제 3고조파 전압 인가



(b) 180° 에서 제 3고조파 전압 인가

그림 6 누설전류의 변화

Fig. 6 Changes of leakage currents

그림 6에는 위상에 따라 고조파 함유량에 의한 누설전류의 크기를 나타낸 것으로 (a)는 기본파 전압의 위상 0° 에서, (b)는 180° 에서 제 3고조파를 중첩시켰을 때의 결과이다.

전술한 바와 같이 기본파 전압의 위상 0° 에서 제 3고조파를 중첩시켰을 때, 제 3고조파 전압의 함유율 증가에 따라 전체누설전류의 최대값은 다소 증가함을 알 수 있다. 그러나 저항분 누설전류의 크기는 오히려 감소하는데, 이것은 저항분 누설전류가 인가 전압에 동상으로 나타나므로 기본파 전압 0° 에서 제 3고조파를 중첩시키면 인가전압의 최대값이 감소하기 때문이다. 그림 6(b)는 제 3고조파를 기본파 전압 위상 180° 에서 중첩시킨 것으로 위상 0° 에서 중첩시켰을 때와는 반대의 경향이 나타나게 된다.

4. 결 론

잘 알려진 바와 같이 피뢰기의 누설전류는 열화에 따라 증가하게 되며, 계통전압이 순수한 정현파라 할지라도 피뢰기 소자의 비선형 저항특성으로 전체 누설전류에는 고조파 성분들이 존재하게 되어 누설전류 측정에 기반을 둔 열화진단기술이 광범위하게 이용되고 있다. 그러나 전원전압에 고조파를 함유하게 되면 피뢰기의 열화정도와 관계없이 누설전류의 변화가 발생하므로 누설전류 측정으로 열화진단시 오차가 발생하게 된다. 실험결과에서도 전체누설전류 및 저항분 누설전류는 기본파전압에 중첩되는 제 3고조파의 크기와 위상에 따라 크게 변화함을 확인할 수 있었으며, 누설전류 측정에 의한 열화진단시 전원전압의 주파수 스펙트럼을 분석하여 측정된 누설전류의 값을 보정하는 것이 필요하다.

[참 고 문 헌]

- [1] S. Tominaga et al., "Stability and Long Term Degradation of Metal Oxide Surge Arresters", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No. 4, pp. 1548~1556, 1980.
- [2] 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.
- [3] Yoshihisa Yamashita et al, "Evaluation of

factors in the degradation of ZnO varistor", T. IEE Japan, Vol.119-B, No.6, pp. 652~657, 1999.

[4] 길경석, 한주섭, 박영호, "뇌충격전류에 의한 산화아연형 피뢰기 소자의 전기적 특성변화", 대한전기학회 논문지, Vol.48C, No.7, pp. 550~555, 1999.

[5] 길경석, 한주섭, "다중뇌충격전류에 의한 산화아연형 피뢰기 소자의 전기적 특성 변화", 대한전기학회 논문지, Vol.49C, No.12, pp. 685~690, 2000.

[6] 길경석 외 5명, "피뢰기 열화진단 기술 및 전문가 시스템", 대한전기학회 논문지, Vol.51C, No.4, pp.152~157, 2002.