누설전류 파고분석에 의한 전력설비의 열화진단 기술

[0]한주섭 · 김명진 · 손원진 · 길경석

한국해양대학교 전기공학과

Deterioration Diagnostic Techniques for Power Facilities by Analyzing Pulse-Height of leakage current

[0]Joo-Sup Han, Myung-Jin Kim, Won-Jin Son, Gyung-Suk Kil

Dept. of Electrical Engineering, Korea Maritime University

E-mail : jshan@kmaritime.ac.kr, kilgs@kmaritime.ac.kr

요 약

본 논문에서는 누설전류 파고분석을 이용한 전력설비의 새로운 열화 진단법을 제안하였다. 현재까지 여러 가지 열화 진단법이 제안되었으며, 평가요소로 누설전류의 크기만을 이용하는 것이 일반적이었다. 본 연구에서는 피뢰기, 케이블 등의 전력설비들이 열화가 진전됨에 따라 누설전류의 파고분포도 크게 달라짐을 알 수 있었다. 따라서 전력설비의 열화진단에 누설전류의 파고분포를 이용하면 기존의 누설전류의 크기만을 이용하는 방법보다 더 정확한 평가가 가능하다. 피뢰기, 케이블을 이용한 여러 가지 적용실험으로부터 제안한 열화 진단법은 충분한 성능이 있음을 확인하였다.

ABSTRACT

This paper proposes a new deterioration diagnostic technique for power facilities by analyzing the pulse-height analysis of leakage current.

Until now, various deterioration diagnostic techniques to prevent power system failures by deterioration of power facilities are suggested, and most of which measures leakage current amplitude only as a estimation parameter. In this experiment, it is known that the pulse heights of the leakage current are increased according to deterioration progress as well as there comes remarkable changes in pulse height distribution thereto. Therefore, the use of pulse height distribution in deterioration diagnostic technique makes more accurate diagnosis than the conventional method by using only leakage current value. From the application test, it is confirmed that the proposed technique has sufficient performance to diagnose deterioration of power facilities.

키워드

Deterioration diagnostic, Lightning arrester, Leakage current, Pulse height distribution, Expert system

Ⅰ. 서 론

최근 산업의 다양화와 고도화로 인하여 전력수요의 급증에 따라 전력계통도 대용량화 · 초고압화가 요구되고 있으며, 이에 따른 전력설비의 신뢰도 및 안정성 등을 고려하는 것이 매우 중요한 문제가 되고 있다. 전력설비를 대용량화를 위하여 기존의 절연재료보다 특성이 우수한 새로운 절연체를 개발을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 전력계통에는 외부로부터의 직격뢰와 유도뢰에 의한 뇌서지 또는 스위치 동작에 의한 개폐서지 등의 급준파 과도과전압이 발생하고, 계통의 정상 운전전압보다 최대 십 수배에 이르며 변압기, 차단기 등과 같은 전력설비의 절연성능을 위협하고 있다. 급준파 과도과전압 외에도 전력설비의 절연성능의 저하시키는 요소로는 화학반응을 촉진하는 온도 상승, 기기의 표면에 발생하는 아크방전, 내부에 존재하는 공극 및 흡습에 의한 수

분 그리고 주위의 기계적 진동에 의한 스트레스 등이 있다.

전력설비에 있어서 절연성능이 저하되면 설치시에 예상한 절연수명을 가지지 못하며 전반적인 전력계통에서의 신뢰성이 저하되며, 정상 운전전압에서도 국부적인 코로나방전이나, 누설전류의 증가 등이 나타나고, 이것들에 의하여 절연성능은 더욱더 저하되어 2차적인 사고를 일으킬 수 있으며, 이와같은 절연열화에 의한 사고는 증가하고 있는 실정이다. 따라서 이러한 절연열화를 진단하는 기술은 경제적인 면에서도 중요하며, 현재 많은 연구가 진행되고 있다[1] ~ [3].

본 연구에서는 ZnO 피뢰기와 전력케이블 등의 전력설비에서 이용할 수 있는 새로운 열화진단 기술을 제안한다[4]. 제안한 누설전류의 파고분포에 의한 열화진단 방법은 운용중인 계통에서 누설전류를 측정하여 신호처리 알고리즘에 의한 열화진전에 따른 전기적 특성변화를 분석하여 열화진단에 필요한 전기적 정보를 도출하였으며, 실험결과를 바탕으로 열화진단 전문가 시스템을 설계·제작하였다.

II. 열화진단 방법 및 전문가 시스템

2.1 열화진단 방법

배전계통 등에 설치되어 있는 전력설비들은 산업 사회의 근대화에 따라 1970년 이후 급증하여 현재까지 사용되어 오고 있다. 또한 산업구조의 복잡 다단화로 예기치 않은 사고가 발생하면 막대한 유·무형의 경제적 손실이 발생하기 때문에 전력설비의 열화 정도를 판단하여 교체하면 설비의 열화에 의한 2차 사고를 미연에 방지할 수 있는 기술이 절실히 요구된다.

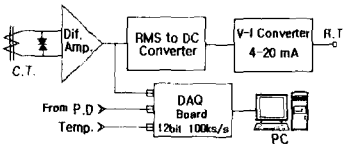
전력설비에 따라 열화를 진단하는 방법은 다양하기 때문에 전력케이블과 ZnO 피뢰기, 애자 등에서 사용되는 방법에 대하여 나타낸다. ZnO 피뢰기에서는 뇌서지가 인가 될 때 방전전류, 제한전압을 측정하는 방법이 있고, 정전용량과 절연저항을 측정하는 방법은 계통에서 분리한 상태에서 측정해야하는 단점이 있다. ZnO 피뢰기에 흐르는 전체 누설전류의 대부분은 용량분 누설전류이며, 열화될수록 저항분 누설전류가 증가하는 것으로 알려져 있다. 운전 중인 상태에서 측정할 수 있는 방법으로 누설전류를 측정하는 방법이 있는데, 전체 누설전류, 제 3조파 누설전류와 저항분 누설전류를 측정하는 방법이 있는데, 단순히 이들 값의 변화만으로는 열화판단에 구체적인 정보를 제공하지 못한다.

케이블과 애자 등의 열화를 진단하는 방법으로는 부분방전 신호를 검출하거나 절연저항, 정전용량을 측정한다. 부분방전 신호를 여러 곳에서 검출하면 전력설비의 절연성능에 문제가 있는 부분을 정확하게 찾을 수 있지만, 부가적인 장치들을 이용해야하며 신호검출이 쉽지 않다. 절연저항 측정은 메가를 1000[MΩ] 이상은 측정이 어렵고 온라인 진단이 불가능하다.

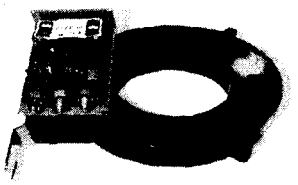
제안한 방법은 ZnO 피뢰기의 접지 측으로 흐르는 누설전류를 관통형 변류기를 이용하여 검출하기 때문에 운전 중에 측정할 수 있으며, 열화진단에 유용한 정보를 제공할 것이다.

2.2 전문가 시스템

본 연구에서 설계한 열화진단 전문가 시스템은 그림 1과 같이 고감도 변류기, 차동증폭회로, 신호변환회로, 입·출력장치(12[bit], 200[ks/s], 8[Ch]) 및 PC-base 분석 프로그램으로 구성되어 있다.



(a) 시스템의 구성도



(b) 누설전류 검출장치

그림 1. 전문가 시스템의 구성
Fig. 1. Configuration of the expert system

정상운전전압에서 피뢰기에 흐르는 전체 누설전류는 100[uA] ~ 수 [mA] 정도이므로 관통형의 고감도 변류기를 이용하여 측정하였으며, 피뢰기가 설치된 주변의 높은 전기장 및 잡음에 의한 측정의 정확도와 안정성을 향상시키기 위하여 차동증폭기(가변이득 60[dB])를 설계하여 미소 누설전류를 증폭하였다.

검출된 누설전류는 A/D 변환기에 입력되어 데이터 취득장치를 통해 개인용 컴퓨터로 전달된다. 데이터 취득장치는 피뢰기에 인가되는 전압과 누설전류 및 주위 온도를 동시에 측정할 수 있으며, 이들의 정보는 본 연구의 실험과정에서 필요한 정보를 획득할 수 있도록 그림 2와 같은 계통도에 의하여 처리된다.

전문가 시스템에서는 각종의 알고리즘(대역필터, 주파수분석, 파고분석기, 위상차검출기)을 적용하여, 입력된 신호(누설전류, 전원전압, 온도)로부터 피뢰기 열화진단에 필요한 정보를 얻을 수 있으며, 세부사항은 다음과 같다.

① 전체 및 제 3조파 누설전류의 주파수 스펙트

럼과 실효값, 최대값, 평균값
② 전원전압의 주파수 스펙트럼과 실효값
③ 전원전압과 전체 누설전류의 위상차
④ 누설전류의 파고 분포
⑤ 주위 온도

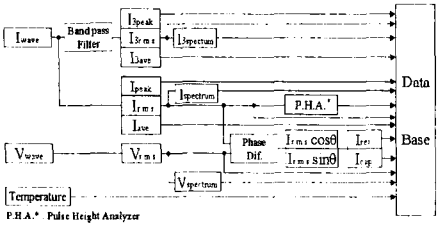


그림 2. 신호처리 계통도
Fig. 2. Signal processing diagram

전문가 시스템에서 전체누설전류의 제 3조파 누설전류인 180[Hz] 성분의 검출을 위한 대역통과필터는 고역통과필터와 저역통과필터를 직렬로 연결하여 구성하였으며, 필터는 Butterworth형의 필터로 차수는 각각 15로 설정하고, 필터의 저역 차단주파수는 175[Hz], 고역 차단주파수는 185[Hz]로 설정하였다.
Butterworth형의 필터는 차단영역과 통과영역에서 리플이 없고, 차수가 높을수록 신호의 차단영역과 통과영역 사이의 출력이 변화하는 부분의 폭이 좁아지는 특성을 가지고 있다.

위상차검출기(Phase Difference Detector)를 이용하여 전원 전압과 전제 누설전류의 위상차 θ를 검출하며, 이것과 식(1)의 관계로부터 전체 누설전류에서 저항분 누설전류와 용량분 누설전류를 구할 수 있다.

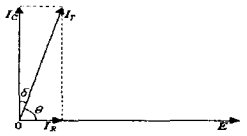


그림 3. 전압과 누설전류와의 위상관계
Fig. 3. Phase relation between voltage and leakage current

인가한 교류전압을 E라고 하면, 전체 누설전류 I_T에서 용량분 누설전류 I_C와 저항분 누설전류 I_R를 위상차와 전체 누설전류의 크기로부터 다음과 같은 관계로 나타낼 수 있다.

$$|I_T| = \sqrt{I_R^2 + I_C^2}, \quad \theta = 90^\circ - \delta \tag{1}$$

$$I_R = I_T \cdot \cos\theta, \quad I_C = I_T \cdot \sin\theta$$

여기서, θ는 전원 전압과 전체 누설전류의 위상차, δ는 유전체 손실각이다.

파고분석기는 전체 누설전류의 파형으로부터 측정·검출하도록 연결되어 있으며, 파형에서 신호가 증가한 후 감소하는 부분을 파고로 인지·검출하여 파고들의 값을 일정시간 동안 저장할 수 있도록 구성하고, 파고의 크기는 5[uA] 마다 구분할 수 있게 설계하였다. 전원 전압의 주파수 스펙트럼을 분석한 것은 전력계통에 포함되어 있는 고조파성분에 의하여 누설전류에 어떠한 영향을 주는가를 확인하기 위하여 구성하였다.

III. 적용실험 및 결과

설계한 전문가 시스템의 열화진단 능력을 평가하기 위하여 ZnO 피뢰기와 전력케이블에 대한 적용실험을 하였다.

그림 4는 배전용 피뢰기(18[kV], 5[kA])에 전문가 시스템을 적용하여 결과를 나타낸 것으로 출력화면에서 인가전압과 전체 누설전류를 나타내었으며, 식 (1)로부터 계산하여 저항분 누설전류와 용량분 누설전류를 나타낸다. 전원전압과 전체 누설전류는 비율을 조절할 수 있는 버튼을 구성하여 파형의 크기를 조절할 수 있게 구성하였다. 누설전류와 전원전압의 각 성분 및 주파수 스펙트럼을 나타내고, 제 3조파 누설전류와 저항분 누설전류를 비교할 수 있게 구성하였다.

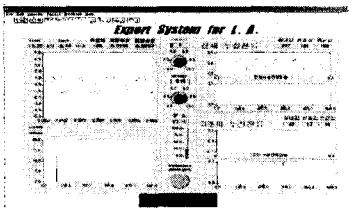


그림 4. 전문가 시스템의 화면
Fig. 4. Main screen of an Expert system

그림 5는 전문가 시스템에 ZnO 피뢰기를 적용하여 누설전류의 파고분포를 나타낸 것이다.

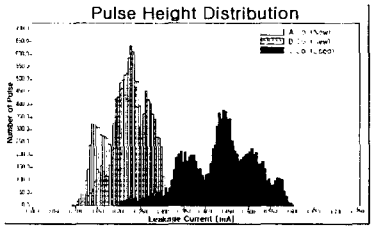


그림 5. 피뢰기 누설전류의 파고분포 예
Fig. 5. Example of the pulse height distribution of leakage current on L.A.

세 가지 종류 즉, A사 및 B사는 피뢰기 신품을 C사는 배전선로에서 1년 6개월정도 사용한 배전용 피뢰기(18[kV], 5[kA])를 대상으로 정상 운전전압에서 전체 누설전류의 파고값을 1분 동안 측정한

것을 나타낸 것이다. A사와 B사의 경우에는 약간의 차이는 있지만 파고의 중심은 200[uA] 정도였으며, 100[uA]에서 300[uA]까지의 파고들이 분포하였다. C사의 제품은 A·B사와는 많은 차이를 가지고 있으며, 파고의 중심은 400[uA]이고 450[uA] 주위의 파고들이 많고 200[uA]에서 600[uA]까지의 파고들이 넓게 분포하고 있다. 세 가지 시료에 대하여 확인한 것처럼 배전계통에서 사용되는 여러 가지 피뢰기에 대하여 적용하면, 신품일 때의 결과와 비교한다면 열화진전의 정도에 따라 파고분포가 이동하고 이들간의 차이를 이용하여 열화진단을 수행할 수 있을 것이다.

CV케이블(3심)을 20[cm]의 길이로 자르고 1심에 대하여 중심도체와 차폐층 사이에 전극을 설치하고 고압변압기를 이용하여 2[kV]를 인가하였으며, 전문가 시스템을 이용하여 누설전류의 파고값을 측정하였다. 수분을 함유한 시료는 케이블을 30분 동안 완전히 침수시킨 후 4시간 동안 건조시켰으며, 공극을 가진 시료는 내부절연체에 임의의 공극을 만들었다. 피뢰기에서와 같이 초기에는 대부분이 절연체에 의한 용량분 누설전류이며, 제조상의 결함이나 장시간의 사용에 의하여 절연체에 공극 또는 수분을 포함하게 되면 점차 저항분 누설전류가 증가하여, 전체적으로 누설전류의 값이 증가하게 된다.

표 1과 그림 6은 전력케이블의 초기상태와 외부에 임의의 공극을 만든 경우, 케이블에 수분을 흡수시킨 경우에 대한 실험결과를 나타낸 것이다. 2[kV]의 전압을 인가하여 1분 동안 측정하였으며, 신품인 경우에 비하여 현저하게 열화된 경우에 있어서 파고분포가 증가한 것을 볼 수 있다.

표 1. CV 케이블 누설전류의 측정 예
Table 1. Example of measuring leakage current on CV cable

인가전압	누설전류(rms)	시료 상태
2[kV]	20[uA]	초기
2[kV]	30[uA]	수분 함유
2[kV]	22[uA]	공극 함유

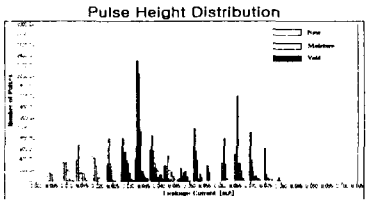


그림 6. CV 케이블에서의 파고분포 예
Fig. 6. Example of the pulse height distribution on CV Cable

초기상태에서는 5~50[uA]사이에 파고들이 존재하며, 수분 함유상태에서는 15~40[uA]와 53~80[uA]사이에 존재하며, 공극을 가진 상태에서는 17~55[uA] 사이에 존재하였다. 시료의 상태에 의하여 파고분포 경향과 파고값들의 차이가 있었다.

Ⅳ. 결 론

본 연구에서는 전력설비 열화진단 기술 중에서 가장 광범위하게 사용되는 방법인 누설전류를 이용한 열화진단 전문가 시스템을 설계·구성하고, ZnO 피뢰기와 전력케이블에 대하여 열화진전에 따른 전기적 특성변화를 측정·분석하였다. 그리고, 새로운 열화진단 방법으로 전체 누설전류의 파고분포를 이용하는 방법에 대해서도 설명하였다.

실험결과로부터 열화진전에 따라 저항분 누설전류가 증가하여, 전체 누설전류의 증가가 나타나는 것을 확인하였다. 또한 열화정도에 따라 누설전류의 파고분포가 현저하게 구분되며, 열화진단 전문가 시스템은 이들의 전기적 정보를 모두 계측하고 분석할 수 있도록 구성하였다.

시제작한 열화진단 전문가 시스템을 18[kV], 5[kA] 정격의 배전용 피뢰기와 전력케이블에 적용하여 측정한 결과, 열화진단에 충분한 성능이 있음을 확인하였다. 향후 본 전문가 시스템의 정도를 향상시키기 위하여, 전력설비에 대한 기초자료를 수집하고 적용·평가함으로써 여러 가지 전력설비에 대하여 적용실험을 수행할 것이다.

참고문헌

[1] 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

[2] 日本電氣學會, 配電設備劣化診斷·豫知技術調査專門委員會, "配電設備劣化診斷技術の動向", 日本電氣學會, No. 555, 1995

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

[4] 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. 7