

상호상관법을 이용한 변압기내의 부분방전 위치측정

문영재*, 구준근, 이상철, 정찬수,곽희로
승실대학교 전기공학과

Position prediction method of Partial discharge in power transformer using Cross-correlation

Young-Jae Moon*, Choon-Keun Koo, Sang-Cheol Lee, Chan-Soo CHUNG, Hee-Ro Kwak
Soong Sill University, Department of Electrical Engineering

Abstract

The partial discharge signal can be used as the detection signal of the deterioration of the power transformer insulation. Detecting this signal, the insulation failure and the point, in which the partial discharge is generated, could be predicted.

In this paper, we study to predict the point, and find that the cross correlation method could predict the point accurately. Also, experimental system and the results are presented here.

1. 서론

전력설비가 커짐에 따라 배전용 변압기의 용량이 커지고 이 들 전력용 변압기가 고장났을 때의 파급효과도 그만큼 커지게 된다. 이에 따라 전력용 변압기의 사고예방을 위한 연구가 꾸준히 진행되어 왔으며, 그 중의 한 방법이 부분방전을 측정함으로써 절연열화를 감지하여, 절연파괴로 확대되어 사고로 연결되지 않고 적절한 조치를 취함으로써 변압기 사고의 파급효과를 최소화 하는 방법이다.

본 연구는 부분방전신호분석 결과 사 고도 확대될 가능성이 큰 것으로 판정된 경우 부분방전의 위치를 정확히 예측하고자 하는 것으로서, 이는 위 판단의 신뢰성을 향상시키고 또한 변압기 수리에 필요한 시간과 경비를 절약할 수 있는 효과를 얻을 수 있다.

변압기내에서 발생하는 부분방전은 절연유의 열화정도, 절연체 내부의 기포발생등 절연상태 불량으로 인해 발생하는 것^[1]으로 부분방전이 발생되면 이를 감지하는 방법으로서 중성선(접지선)에서 부분방전에 의한 미소전류를 측정하는 전기신호 측정법과 부분방전 발생시 발생하는 초음파 신호를 측정하는 초음파 신호 측정법이 있다. 그런데 전기적 신호의 전달속도는 광속이고 절연유내에서의 초음파 전달 속도는 천 수백 m/s 정도^{[6], [7]}이므로 두 신호의 시간차이를 이용하여 발생위치를 예측할 수 있다. 또 다른 방법으로는 서로 다른 두 지점에서 초음파를 측정하고 두 신호의 시간차이를 이용하여 발생위치를 예측하는 방법이 연구되고 있다.

그런데 전기신호나 초음파신호 모두 매우 미소신호이므로 측정 과정에서 유입되는 잡음으로 인해 신호의 도달시간을 정확히 판정하기가 어렵다.

숙련된 사람의 경험으로 판정하면 어느 정도 실용성이 있는 정도를 얻을 수 있음이 실험적으로 입증되었으나^[2], 전문가가 아닌 사람도 예측장비를 사용할 수 있어야 하므로 표준화되고 보편화된 측정방법이 필요하다.

또한 전문가가 작업을 한다하여도 일일이 수작업을 거쳐야 하는 불편함이 있고 측정오차가 항상 존재하므로 통계처리를 해야 하므로 전문가 시스템이나 기타 신뢰성있는 사고예측기법을 적용할 수 없게 된다.

측정오차는 부분방전 위치측정의 Software 처리를 어렵게 하므로 거리측정의 자동화에 무리가 따른다.

본 논문에서는 이런 여러 문제점을 해결할 수 있는 방법으로 두 개의 초음파신호를 상호상관법을 적용^[11]하여 거리측정의 신뢰성을 높이고 거리측정의 통계처리를 통해 자동거리측정 System을 구현하는 것을 목적으로 하고 있으며 다음과 같이 구성되어 있다.

"2장. 부분방전 발생위치 예측방법"에서는 초음파신호와 전기신호의 특성 및 각 각을 이용한 거리 측정 방법^[2]에 관하여 조사하고 "3장. 상호상관법에 의한 부분방전 발생위치 예측방법"에 있어서는 상호상관법에 대한 설명과 두 개의 초음파 신호에서 시간차이를 구하는 예를 보이며 "4장. 음향신호 측정 및 발생위치 예측"에서는 실험장치에 대한 간단한 설명과 실제 실험내용을 보이고 "5장. 결론"에서는 상호상관법을 바탕으로 한 거리측정이 거리측정법으로 타당하다는 것을 보일 것이다.

2. 부분방전발생위치 예측방법

부분방전의 발생위치 예측방법에는 전기-초음파 신호에 의한 방법^[2],^[6],^[11]과 초음파-초음파 신호에 의한 방법^[1] 두 가지가 있다.

2-1. 초음파 신호

변압기 내에서 부분방전이 일어나면 주파수 150-230 KHz 정도의 초음파 신호를 발생시킨다^{[3], [4]}. 이는 부분방전이 발생한 지점 부근에서 국부적인 열발이 동반되고 그 발생열에 의해서 주변의 절연유가 급격한 압축을 받아 충격파도 되어 Pulse 형태의 초음파를 발생시킨다는 이론에 의한다.^[8] <그림1>은 부분방전에 의해 발생한 대표적인 전기신호와 초음파신호이고, <그림2>는 <그림1>의 초음파신호의 스펙트럼이다.

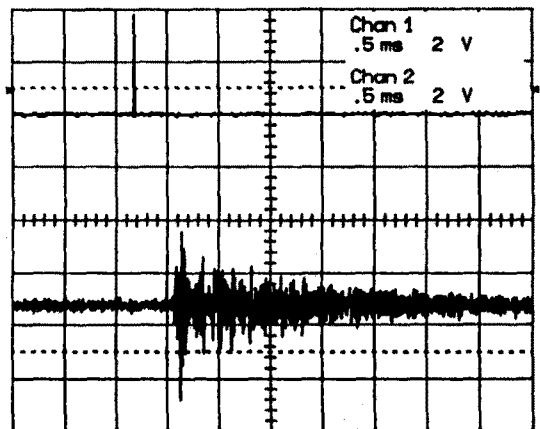
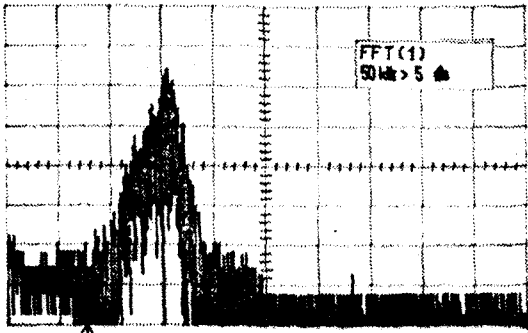


그림1. 부분방전에 의한 전기신호와 초음파 신호
Fig 1. Electric signal and Ultrasonic signal by PD



Function E [155.00 kHz, 500.00 kHz] 3451 pts

그림 2. 부분방전에 의한 초음파 신호의 스펙트럼

Fig 2. Spectrum of Ultrasonic signal by PD

2-2. 전기-초음파 신호에 의한 거리 측정법

이 방법은 전기 신호를 기준으로 하여 초음파신호가 발생하는 시점까지의 시간차이로 부분방전의 위치를 계산하는 방법이다. 여기서 기준이 되는 전기신호는 변압기의 접지선에 설치한 Rowgski Coil에 포착된 부분방전 발생시의 Pulse형태의 전기신호(2.1.6)이고 초음파신호는 변압기 외벽에 부착한 초음파 센서로 포착한 신호이다. 전기신호의 속도는 광속과 같으므로 시간차이가 거의 없고(1m 거리에 3.3 Psec의 시간차) 초음파신호는 80°C에서 1200m/sec(6).171이므로 (1m 거리에 0.83 msec의 시간차) 양 신호간의 시간차이에 그 온도에서의 유중초음파 전달속도를 곱하여 그 거리를 산출해 낼 수 있다.

이 방법은 번개가 번쩍인 후 천둥이 칠 때 까지의 시간으로 번개가 친 곳의 위치를 찾아 내는 것과 동일한 원리이다.

그림 3은 전기신호-초음파신호에 의해 방전 위치를 예측 할 때 초음파 신호가 시작되는 부분을 확대한 것이다. 이때 threshold level을 낮추면 잡음의 영향이 커지고 이를 키우면 그림 3에서 보는 바와 같이 오차를 유발한다. 이런 점을 극복하기 위해 초음파-초음파 신호에 의한 위치 측정법이 연구되고 있다.

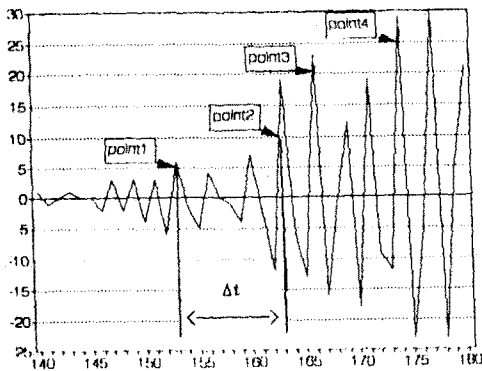


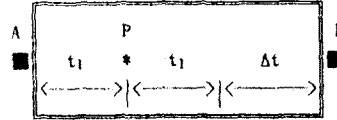
그림 3. Threshold level 설정에 의한 오차

Fig 3. Error by institution of threshold level

2-3. 초음파-초음파 신호에 의한 거리 측정법

이 방법은 기준이 되는 신호가 초음파이고 비교대상신호도 초음파인 방법이다. 이 경우 한 방전에 대하여 변압기 외벽의 서로 다른 위치에 부착한 초음파 센서로 포착한 초음파 신호 상호간의 시간차이로 그 거리를 산출해 내는 방법이다.

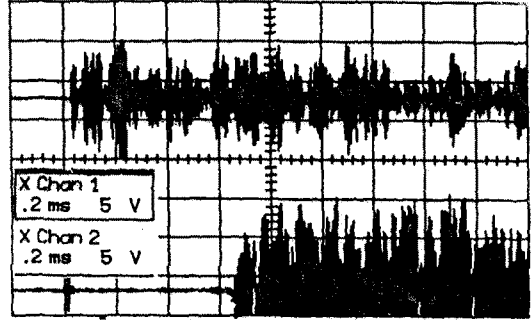
모의 변압기



(a) 방전점과 센서의 위치도

[P:방전점, A:센서, B:센서, S:변압기의 전체길이]

(단, P, A, B점은 한 평면상에 있다고 정의한다.)



(b) 초음파 신호

그림 4. 초음파-초음파 신호에 의한 거리 측정법

Fig 4. Distance measurement method by two ultrasonic signals

그림 4-a에서와 같이 P에서 센서 A까지 도달하는 시간 t_1 동안에는 신호가 감지되지 않다가 시간 t_1 후에는 신호가 감지 될 것이다. 신호 A가 감지되기 시작하는 시점에서도 신호 B는 센서에 도달하지 않았으므로 신호가 검출되지 않을 것이다. 시간($t_1 + \Delta t$) 후에는 센서 B에서도 신호가 감지되고 이 둘 신호 A, B가 감지 되는 시간은 Δt 만큼의 차이가 생긴다.

센서 A, B사이의 거리를 S라 했을 때 초음파신호가 A에서 B까지 전달되는데 소요되는 시간을 T라 하자.

이제 P의 위치를 구해보면

$$T - \Delta t = 2 t_1 \quad \dots\dots(2-1)$$

이 방정식을 풀어 t_1 을 구할 수 있으므로 A에서 Vt_1 만큼 B에서 $V(t_1 + \Delta t)$ 떨어진 위치임을 알 수 있다. (단, V는 초음파속도) 그러나 이들 두 가지 방법은 초음파 신호의 시작점을 결정하기 곤란하다는 문제점을 가지고 있다.

전기신호는 거의 완전한 형태의 Pulse이나 초음파 신호는 외부신호에 의한 잡음, 잔향효과등으로 인하여 그 시작점을 threshold level이상이 되는 점으로 정의한다 하여도 그 오차를 최소화하는데 한계가 있음은 위에서 언급한 바와 같다.

3. 상호상관법에 의한 부분방전발생위치 예측방법

앞 절에서 본 바와 같이 초음파-초음파 신호에 의한 방법에서 두 신호가 센서에 감지되는 시간 차이를 정확히 찾는 문제점을 해결하기 위해 도입한 방법이 상호상관법이다.

상호상관계수 $r_{xy}(\tau)$ 는 신호 $x(t)$ 와 $y(t)$ 가 시간차를 가지는 유사한 주파수 성분을 가질 때 그 시간차에서 큰 상호상관값을 갖게 되며(1) 상호 상관계수 $r_{xy}(\tau)$ 는

$$r_{xy}(\tau) = \frac{1}{k} \left[\sum_{i=0}^k [x(n)y(n-i)] \right] \quad \dots\dots(3-1)$$

와 같은 식으로 계산된다.

상호상관법은 외란에 의한 측정잡음(일반적으로 모든 주파수 영역에 실리는 백색잡음)의 영향에 덜 민감하며 비교적 정확한 시간차를 찾을 수 있으므로 시간영역에서의 threshold level에 의해 시작점을 찾는 방법보다 정확한 값을 얻을 수 있다.

<그림 5>는 한 신호와 이 신호를 일정시간 지연시키고 시간차를 두고 평균이 0이고 분산이 4인 백색잡음을 포함시킨 두 신호의 상호상관함수를 도시한 것이다.

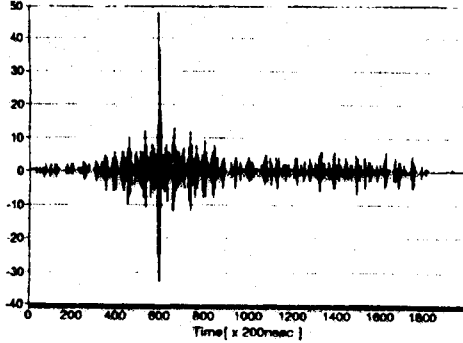


그림 5. 두 신호의 상호상관

Fig 5. Two crosscorrelation of two ultrasonic signals.

4. 음향신호 측정 및 발생위치 예측

4-1. 실험장치

본 실험에서의 실험장치는 모의 변압기, Pre Amp, Filter와 Main Amp, 파형을 저장하기 위한 memory와 memory timing을 맞추기 위한 Timing Circuit, 이를 전반적으로 제어하는 Personal Computer로 구성되어 있다.

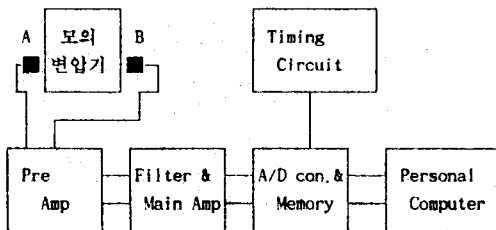


그림 6. 실험장치의 전체적인 구성도

Fig 6. Block Diagram of Experimental Equipment

Memory에 저장되는 파형은 일반 단상교류 전원의 Peak to Peak구간으로 이 구간에서 부분방전이 일어날 확률이 높기 때문이다. 이 부분 동작점을 찾기 위한 장치가 Timing Circuit 부분이다. Memory에 저장된 부분방전의 파형은 일반 Personal Computer로 읽혀져 상호상관함수가 계산되고 이를 바탕으로 두 음향신호의 시간차를 구하게 된다.

4-2. 측정결과

<그림7>은 부분방전 발생용 모의 변압기의 단면도로서 센서 A에서 P까지 거리 a를 32cm, 센서 B에서 P까지 거리 b를 48cm, 거리차는 16cm이다. 이때의 A, B센서에서 포착한 신호 A와 신호 B를 각각 $x(t)$, $y(t)$ 라 하고 상호상관함수 $r_{xy}(\tau)$ 를 구해보면 <그림7>의 그림과 같다.

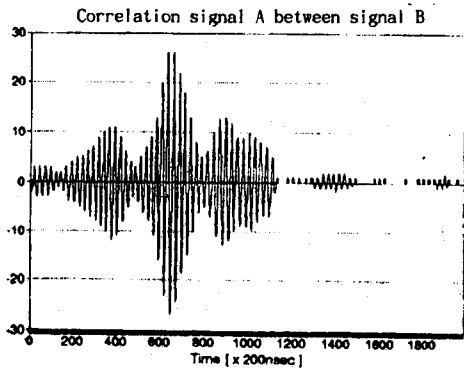
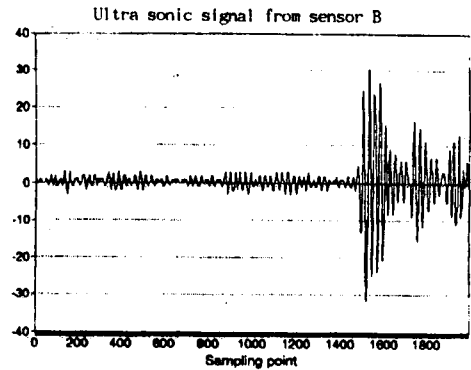
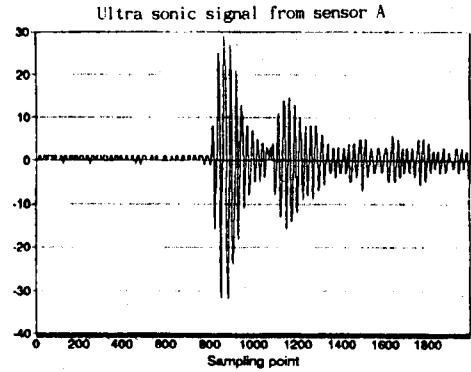
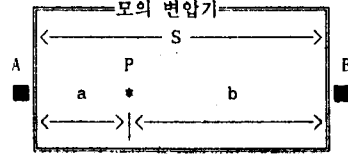


그림 7. 신호 A, B와 그 상호상관함수 $r_{xy}(\tau)$

Fig 7. Signal A, B and Correlation $r_{xy}(\tau)$

<그림 7>의 파형은 규준화 시킨 파형이므로 크기가 1이 되는 점의 시간이 시간차라고 할 수 있을 것이나 실제적으로는 최대치부근에 Threshold level을 정하여 최소 시간과 최대 시간의 평균을 구하여 시간차로 하는 것이 좀 더 정확한 시간차의 값을 얻을 수 있다.

<그림 7>의 파형에 Threshold level을 각각 다르게 설정하여 threshold level이상의 값들을 구해보면 표1과 같다. 단, 이때의 변압기 내부의 절연유 온도는 25°C로 했다.

| level [%] | level 이상의 point 수 | 평균시점 [x 200ns] | 거리차 [Cm] |
|-----------|-------------------|------------------|----------|
| 95 | 5 | 648.00 | 15.81 |
| 90 | 9 | 648.00 | 15.81 |
| 85 | 19 | 649.89 | 15.83 |
| 80 | 22 | 649.77 | 15.83 |
| 75 | 27 | 653.22 | 15.94 |
| 70 | 41 | 652.41 | 15.92 |

표1. Correlation 결과에 대한 Threshold level과 그 이상의 시간점들

Table 1. Threshold level and higher value than level about correlation result

표1에서 얻은 시간점들의 평균은 level에 따라서 어느 정도의 오차를 보였으나 차이가 가장 큰 95%와 75%의 경우 시간상으로 1μsec, 또한 거리상으로도 인위적으로 설정한 16cm와 비교해서 0.13cm이므로 거의 정확한 값이라고 할 수 있으며 오차를 0.0081%의 거리측정 System이라 할 수 있다.

5. 결론

변압기내에서의 부분방전의 위치를 정확히 판단한다는 것은 사고이전에 변압기를 수리하는데 있어서 비용 및 시간의 절약이라는 이점을 얻을 수 있다.

이러한 부분방전의 위치측정에는 기준신호와 비교신호간의 시간차를 이용하여 그 위치를 파악하는 방법이 사용되어 왔으나 초음파신호의 경우 부분방전에 의한 초음파신호의 구분이 정확하지 않았고 이런 이유로 통계적 처리를 하는데 있어서 곤란한 점이 많았다. 이에 상호상관법을 이용한 신호처리 방법을 통하여 이런 단점을 보완하고 위치측정의 오차를 줄여 통계적 처리를 가능케하고 나아가서 전문가가 아니더라도 거리측정을 할 수 있도록 하는 것이 이 논문의 목적이다. 실험을 통하여 Software적 처리를 통해 거리측정의 수작업을 최소로 줄이고 자동화할 수 있는 가능성을 제시하였으며 좀 더 연구하여 하나의 Software로 처리할 수 있도록 개발되어야 할 것이다.

6. 참고문헌

1. S.L. Jones, "The detection of partial discharge in power transformers using computer aided acoustic emission techniques", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Toronto, Canada June 3-6, 1990
2. 전력기기 예방진단 기술연구 (최종보고서) 1991.3.
한국 전력 기술 연구원
3. E. Howells & E.T. Norton, "Detection of partial discharge in transformers using acoustic emission techniques", IEEE Transactions on Power Apparatus and System, vol. PAS-97, No. 5, Sept/Oct 1978.
4. H. Kawada, M. Honda, T. Inoue & T. Amemiya, "Partial discharges automatic monitor for oil-filled power transformer", IEEE Transaction on Power Apparatus and System, vol. PAS-103, No. 2, February 1984.
5. 각희로의 5명, "Rowgoski Coil과 초음파 센서를 이용한 변압기내 부분방전 탐지 및 위치검출", 대한전기학회 하계 학술대회 논문집 1990. 7.
6. 각희로, 김재철, 조국희, "개선된 초음파방법에 의한 변압기내 부분방전 위치 검출", Journal of the Institute of Basic Science and the Industrial Technology Research Institute, Soong Sil University, Vol. 19, 1989.
7. E. Howells, E.T. Norton "Location of Partial Discharge Sites in Online Transformers", IEEE Transaction on Power Apparatus and System, Vol. PAS-100, No. 1, January 1981.
8. Maurice G. Bellanger, "Adaptive Digital Filters and Signal Analysis", Marcel Dekker, Inc 1987.
9. R. Bartnikas, "Corona discharge processes in voids", Engineering Dielectrics Volume 1, Corona measurement and Interpretation, American Society for Testing and Materials 1979.