

매질에 따른 초음파 신호의 특성을 이용한 변압기내 부분방전 위치 추정

서인철*, 김영노, 전영재, 김재철
 송실대학교 전기공학과

Location of Partial Discharge in Power Transformer Using Ultrasonic Signal's Characteristic with Medium.

In-Chul Seo*, Young-No Kim, Young-Jae Jeon, Jae-Chul Kim
 Dept. of Electrical Eng., Soong-Sil University

Abstract - This paper describes an efficient location detection algorithm for a partial discharge(PD) source in the transformer. The algorithm is previously proposed is not suitable for PD source detection because ultrasonic signal is diminished through the inner structure. In this paper, the proposal algorithm find PD source using geometry method and 3th sensor on the one side of transformer without diminution of ultrasonic signal. The proposed algorithm demonstrates the effectiveness and validity on model transformer.

1. 서 론

최근 경제 성장에 따라 대규모 전력수요가 대도시 지역에 편중되어 증가하는 반면 전력설비는 건설비, 지대, 환경 등의 여러 요인에 의해 증설에 많은 어려움을 겪고 있다. 이러한 상황에서 이미 설치된 전력설비들의 노후화가 공급 신뢰도를 상당히 저하시키기 때문에 전기공급의 중요한 역할을 하고 있는 대형 전기설비의 감시 및 고장방지와 효율적인 보수관리가 필요한 실정이다. 전력설비 중에서도 전력용 유압 변압기는 전력 시스템의 중요한 구성요소로서 전력의 안정 공급을 위한 역할이 매우 크며, 특히 기간 시스템에 있어서는 높은 신뢰도를 유지할 필요가 있다. 따라서 국내의 전력설비 중에서 사고 비율이 30%에 이를 정도로 중요한 전력용 변압기에 대해 유지 및 보수를 합리화하고 사고를 미연에 방지할 수 있도록 운전 중에 이상의 징후를 감시하고 진단하는 기술이 중요한 요소로 대두되고 있다[1].

전력용 유압 변압기의 주요 사고 원인은 내부 절연 이상으로 대부분 부분 방전을 수반하며, 변압기 이상 상태 시 부분 방전은 다른 징후보다 응답 특성이 매우 빠르기 때문에 부분 방전을 지속적으로 관찰하면 사고를 미연에 방지하거나 감소시킬 수 있다. 변압기 내에서 발생된 부분방전의 위치를 추정하기 위한 방법은 전기신호-초음파 신호(electrical signal-ultrasonic signal) 측정법과 초음파신호-초음파신호(ultrasonic signal-ultrasonic signal) 측정법이 있다. 전기신호-초음파신호 측정법은 부분방전의 발생과 동시에 변압기 접지축의 로고우스키 코일(Rogowski-coil)에서 검출되는 전기신호와 일정 시간 지연 후 변압기 외벽에 부착된 초음파센서(ultrasonic sensor)에서 검출되는 초음파신호의 시간차를 이용하는 방법이다. 그러나 이 방법은 현장 적용용 부분방전의 전기신호 검출이 어려운 단점이 있다. 초음파 측정법은 부분방전시 발생하는 초음파신호를 변압기 외벽에서 2개 이상의 초음파센서로 검출한 후, 시간차를 거리차로 환산하여 부분방전 발생위치를 추정하는 방법이다. 따라서 부분방전시 발생하는 전기신호에 영향을 받지 않고, 초음파센서 등과 같은 간단한 장치로 부분방전 위치추정이 가능하기 때문에 유용하다.

현재 국내의 765(kV) 변압기 예방진단시스템을 보면 변압기 외함에 12개의 초음파 센서를 부착하고, 부분방

전에 의한 초음파 신호를 변압기의 운전 중에 상시 측정하여 부분방전의 발생 여부와 영역적인 발생위치를 판단하고 있다[2]. 하지만 최근 전력수요의 증가에 따른 전력용 변압기의 대형화에 따라 다수의 초음파 센서를 변압기 외함에 부착하더라도 변압기 내의 구조물로 인한 부분방전 신호의 감쇄로 인해 양쪽 면의 초음파 센서쌍을 이용한 기존의 위치 추정법으로는 정확한 위치추정이 어려운 실정이다.

본 논문에서는 다수의 센서가 부착된 변압기에서 부분방전이 발생한 위치에서 가장 가까운 쪽의 외벽에 부착된 초음파 센서만으로 위치를 추정하는 방법을 제안하였다. 제안된 위치 추정법은 변압기내의 유증 및 변압기 외함의 초음파 신호의 전달특성을 이용하였고, 한쪽 면에 부착된 센서 3개로 위치를 추정할 수 있는 기하학적인 기법을 사용하였다. 모의 변압기에서 전압을 직접 인가하여 부분 방전을 발생시켰고, 실제 발생 위치와 제안한 방법으로 추정된 위치를 비교하여 제안한 위치 추정 알고리즘의 효용성을 입증하였다.

2. 초음파 신호를 이용한 부분방전 위치 추정

2.1 매질에 따른 초음파의 전달 특성

기존의 연구에서는 변압기 양쪽에 부착된 센서로 초음파 신호를 취득하고 두 초음파 신호의 시간차를 이용하여 위치를 추정한다. 변압기의 대형화에 따라 이전에 비해 보다 많은 센서를 부착하지만 변압기 내의 구조물로 인해 초음파 신호의 감쇄가 많이 일어나 정확한 위치를 추정하기가 더욱 어려워지고 있다. 따라서 본 논문에서는 부분방전이 발생한 가까운 면에 부착된 3개의 센서로 위치를 추정하는 방법을 제안했고, 이 위치 추정 기법은 매질에 따라 초음파 전달 특성이 다르다는 것을 이용하였다. 초음파 신호는 일반적으로 변압기 외벽(steel)과 변압기 유(oil)를 통과한 신호가 합쳐져 초음파 센서에 전달된다. 초음파 신호는 매질에 따라 전파속도가 다르기 때문에 변압기 외벽을 통과해서 센서에 도달하는 초음파 신호의 특성을 알고 이를 이용한다면 내부 구조물로 인한 초음파 신호의 감쇄없이 한쪽 면의 센서들로만 위치를 추정할 수 있다. 변압기 외벽을 통한 초음파 신호의 특성을 알기 위해 그림 1에 보이는 것처럼 센서를 이동해가며 초음파 신호를 취득하였다.

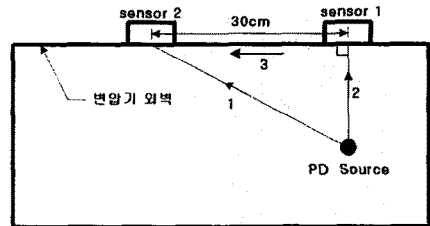


그림 1. 초음파 신호의 전달 특성을 위한 센서 이동

부분 방전원과 센서의 위치에 따라 초음파 신호의 특성을 알아보기 위해 부분 방전원과 법선 방향에 센서를 부착하여 초음파 신호를 취득한 후 30cm 이동된 거리에 센서를 부착하여 다시 초음파 신호를 취득하였다. 법선방향에 부착한 센서를 통해 얻은 초음파 신호는 그림 2와 같다.

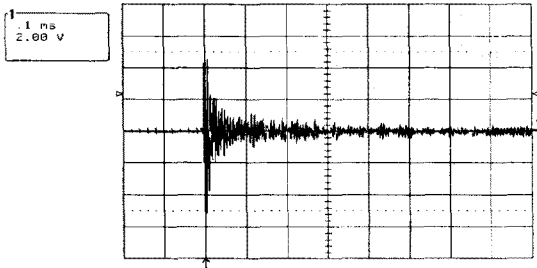


그림 2. 법선방향에 부착된 센서로 측정된 초음파 파형

그림 2는 부분 방전원과 법선방향에 부착되었기 때문에 초음파 신호는 그림 1의 경로 2만을 통과하여 센서에 도달한다. 변압기 외벽을 통과하지 않기 때문에 그림 2에서 보는 것과 같이 유증을 통과해서 오는 신호보다 먼저 도달하는 현상이 발견되지 않는다. 반면에 법선 방향에서 30cm 이동하여 취득한 초음파 신호는 그림 3과 같이 변압기 외벽을 통과한 신호가 유증을 통과한 신호보다 먼저 센서에 도달하기 때문에 초음파 신호의 최대치 앞에 감쇄되어 도달한 신호가 나타난다[3].

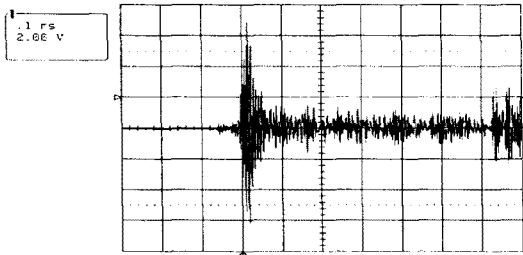


그림 3. 30cm 이동해서 얻은 초음파 파형

변압기 외벽을 통과하여 먼저 센서에 도달하는 부분을 헤더 신호(header signal)라고 하며, 이를 근거로 매질 따른 전달 특성을 이용하여 부분방전의 위치 추정에 적용시킬 수 있다[4,5]. 하지만 기존에 제시되었던 이러한 방법은 header signal 부분이 zero인 부분을 찾기 위해 센서를 옮겨다니면서 부분방전 발생원과 직각이 되는 부분을 찾아야 하는 번거로움이 있었다.

본 연구에서는 센서를 이동시키는 어려움 없이 센서를 고정시킨 상태에서 초음파의 매질에 따른 전달특성을 이용하여 부분방전 발생원을 찾는 기하학적 위치추정방법을 제안하였다.

2.2. 기하학적 기법을 이용한 위치 추정 알고리즘

한쪽 면의 센서들로 부분 방전원을 찾기 위해서는 초음파 센서에 header signal이 전달되는 속도를 거리로 바꾸어 부분 방전원에서 변압기 한쪽 면에 법선방향으로 내려서 만나는 지점과 이로부터 각 센서까지의 거리를 구하는 것이 필요하다. 이를 위해 변압기 한쪽 면에 초음파 센서가 부착되고 변압기 내에 부분방전이 발생한다고 가정하여 위치추정에 필요한 수식을 전개하였고, 이와 관련된 개념과 파라메타 정의가 그림 4에 나와 있다.

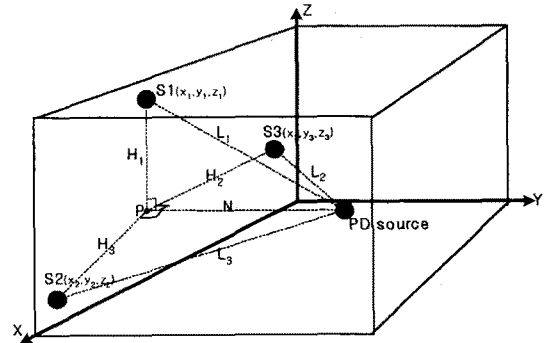


그림 4. 한쪽 외벽(X-Z평면)에 부착된 센서만을 이용한 위치추정

여기서,

- L_i : source에서 초음파센서(S_i)까지의 거리(mm)
- N : source에서 X-Z 평면에 법선으로 내린 거리(mm)
- H_i : P점에서의 각 센서까지의 거리(mm)
- $S_i(x_i, y_i, z_i)$: 초음파 센서 S_i 의 좌표

그림 4에서 앞서 언급한 초음파의 전달 특성을 이용하여 부분 방전원을 추정하기 위해 초음파 센서 S_1, S_2, S_3 의 관련 식을 유도하면 식(1)과 같고, 이를 통해 각 초음파 센서의 위치를 중심으로 하고 H_1, H_2, H_3 을 반지름으로 하는 원들의 교점(P)을 구할 수 있다.

$$(x-x_i)^2 + (z-z_i)^2 = H_i^2 \quad (1)$$

식(1)의 H_i 는 부분방전에 의해 발생된 각 센서의 header signal part의 시간과 변압기 외벽에서의 초음파의 전파속도로써 알 수 있다.

결국 식(1)의 방정식을 계산하면 P점의 좌표 중 x값 및 z값을 알 수 있으며 X-Z 평면에서 source까지의 거리(N)만 구하면 최종적인 PD Source의 좌표를 구할 수 있다. 따라서 N의 값을 알기 위해 X-Z평면에서 source까지의 거리(N)와 부분방전원에서 각 초음파 센서까지의 거리(L_i) 및 각 센서의 header signal part의 길이(H_i)를 이용하여 3개의 직각삼각형을 만들 수가 있으며 이들의 관계식을 구하면 다음과 같다.

$$N^2 = L_i^2 - H_i^2 \quad (2)$$

부분방전원에서 초음파 센서(S_1), 초음파센서(S_2)까지의 거리차는 이들 센서에서 얻어지는 두 신호의 시간차(Δt_{12})에 유증에서의 초음파의 전달 속도(v)를 곱한 값이 된다. 즉, $|L_1 - L_2| = v \cdot \Delta t_{12}$ 이다. 두 신호의 시간차는 식(3)의 상호상관법을 이용하여 정확한 값을 얻을 수 있으며 상호상관값($R_{xy}(k)$)이 가장 클 때의 해당하는 Sampling Number에 Sampling time을 곱한 값을 두 신호의 시간차로 구할 수 있다[6].

$$R_{xy}[k] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1-k} S1[n] S2[n-k], \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (3)$$

식(2)는 Δt_{12} 가 양의 값일 경우 두 신호의 거리차를 적용하면 다음과 같이 정리된다.

$$L_1^2 - H_1^2 = L_2^2 - H_2^2 = (L_1 + \Delta t_{12} \cdot v)^2 - H_2^2 \quad (4)$$

식(4)을 L_1 에 관하여 정리하면 부분방전원으로부터 초음파센서(S_1)까지의 거리(L_1)를 다음의 식(5)와 같이 구할 수 있다.

$$L_1 = \frac{H_2^2 - H_1^2 - (\Delta t_{12} \cdot v)^2}{2 \cdot \Delta t_{12} \cdot v} \quad (5)$$

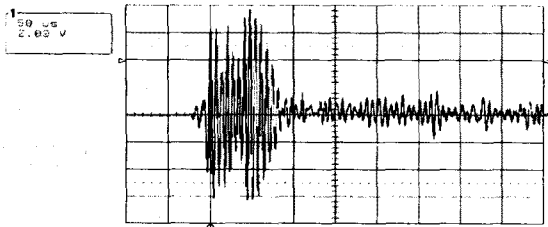
$$L_2 = L_1 + \Delta t_{12} \cdot v \quad (6)$$

따라서 L_1 및 H_1 의 값을 식(2)에 대입하면 N 의 값을 알 수 있고 부분방전원의 최종적인 위치를 구할 수 있다.

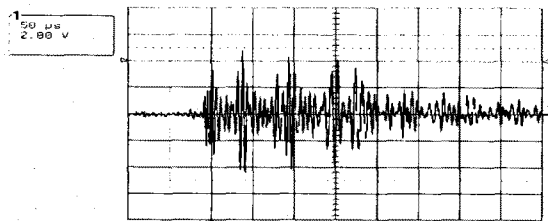
3. 사례연구

앞에서 제시한 위치 추정 알고리즘을 이용하여 실제의 부분방전 발생점을 검출하기 위해 모의변압기(650(mm)×650(mm)×800(mm))내에 침 대 평판 전극(325×200×120)을 설치하고, 변압기 한 쪽 외벽(X-Z평면)에 150(kHz) 공진 주파수를 갖는 DECI사의 SE 150-RI 초음파 센서 3개를 부착하였다. 침과 평판의 간격은 20(mm)이고 인가전압은 12(kV)로 일정하게 인가하였다. 부분방전 발생원의 좌표는 (325, 200, 120), 초음파 센서의 좌표는 S1(325, 0, 260), S2(500, 0, 70) S3(140, 0, 70)이었다. 일반적으로 초음파 센서에서 검출되는 신호는 미세한 신호들이므로 40(dB)의 이득을 지닌 전지증폭기(Pre-amp)를 사용하여 신호를 증폭하였다.

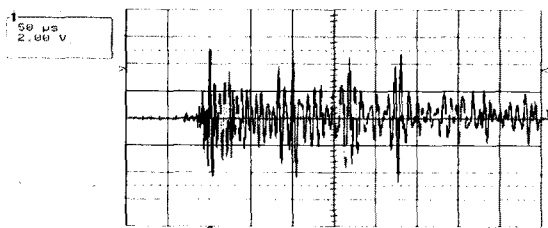
그림 5는 변압기의 한쪽 외함(X-Z평면)에 부착된 3개의 초음파 센서에서 측정된 부분방전 신호를 나타낸다.



(a) 초음파 센서(S1)에서 측정된 초음파 신호



(b) 초음파 센서(S2)에서 측정된 초음파 신호



(c) 초음파 센서(S3)에서 측정된 초음파 신호

그림 5. 3개의 초음파 센서에서 검출된 초음파 신호

그림 5에서 각각의 초음파 센서에 Header signal part가 발생함을 알 수 있으며, 식(1)을 이용하여 부분방전 발생원이 X-Z평면과 수직으로 만나는 점 P의 좌표 (324,0,121)를 구할 수 있었다.

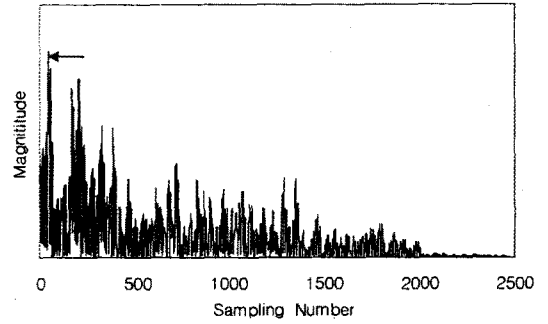


그림 6. 초음파 센서 S1과 S2의 상호상관값

그림 6은 초음파 센서 S1과 S2에 전달된 두 신호간의 시간차를 구하기 위해 식(3)의 상호상관함수를 적용한 그림이다. 상호상관함수를 적용한 시간차는 약 18[μs]였으며 이를 거리차로 환산한 부분방전 발생원에서 초음파 센서(S1)까지 거리(L_1)는 234(mm)이었다.

이를 식(2)에 적용한 결과 $N=213$ (mm)이었으며 앞에서 제시한 방법으로 부분방전 발생원의 최종적인 위치를 구한 결과 좌표는 (324, 213, 121)이었다. 이는 부분방전원의 실제 위치와 다소 차이가 있으나 이러한 차이는 정확한 센서의 부착위치 측정 및 침-평판 전극의 위치 측정이나 header signal의 시간측정 등에서 발생할 수 있으며 오차를 보완하면 현장에서 적용할 수 있을 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 매질에 따른 초음파 전달특성을 이용하여 변압기의 한쪽 외함에 부착한 초음파 센서만으로 부분방전원의 위치를 검출할 수 있는 방법을 제안하였다. 전력용 변압기의 대형화에 따라 부착되는 초음파 센서의 수가 늘었지만 변압기 내의 구조물로 인한 부분방전 신호의 감쇄로 인해 정확한 위치추정이 어려운 실정이다. 따라서 본 논문에서는 다수의 초음파 센서를 부착하여 상시감시중 가장 명확한 초음파 신호가 감지되는 쪽의 외함에 부착된 초음파 센서를 이용하여 변압기 내의 구조물로 인한 영향을 받지 않고 위치를 추정할 수 있는 알고리즘을 제시하였다. header signal의 측정과 외함에서의 전달속도에 대한 연구가 앞으로 진행된다면 보다 신뢰성 있는 위치추정을 할 수 있을 것으로 기대된다.

(참 고 문 헌)

- [1] 김재철 외, "전력용 변압기 사고 감소에 관한 연구 과제 관리(연구 보고서), 전력연구원, 1994
- [2] 정길조 외, "765kV 변전기기 예방진단시스템 개발", 대한전기학회 국제연구기관 특별 Session 논문집, pp.161~163, 1996.
- [3] 전영갑 외, "전력설비사고예방 및 진단시스템 개발에 관한 연구", 한국전력공사 보고서, 1993
- [4] 진상범 외, "변압기내에서 초음파 신호의 전달경로에 의한 위치 추정 기법", 대한전기학회 춘계학술 대회 논문집, pp.285~287, 1999
- [5] E.Howells et al., "Location of partial discharge site in on-line transformers" IEEE Trans. PAS, Vol.100, No.1, pp.158~161, 1981
- [6] Koichi NAKAMURA et al. "Acoustic Based Location of Corona Discharge in Oil-filled Transformer" Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan B - A Publication of Power and Energy Society, V.116-B N.10, 1996