

초음파 전달특성과 신경망을 이용한 효과적인 부분방전 위치 추정

서인철*, 김재철, 전영재, 김영노
 송실대학교 전기공학과

Effective Location Estimation of Partial Discharge
 Using Ultrasonic Signal's Propagation Characteristic and Neural Network

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

Abstract - This paper presents an efficient location estimation methodology for a partial discharge(PD) source in the power transformer. The methodology previously proposed is not suitable for locating a PD source because the ultrasonic signal with medium attenuated through the inner structure. In general, the propagation characteristic of ultrasonic signal with medium is different. Therefore, using this propagation characteristic, we can detect the location of PD source. In this paper, the proposal algorithm finds the PD source using three sensors attached to one side of the transformer without attenuation of the ultrasonic signal and applying the neural network based geometrical method. The proposed methodology demonstrates the effectiveness and validity on an experimental transformer.

1. 서론

전력설비 중에서도 전력용 유입 변압기는 전력 시스템의 중요한 구성요소로서 전력의 안정 공급을 위한 역할이 매우 크며, 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 감지하고 진단하는 기술이 중요한 요소로 대두되고 있다[1].

전력용 유입 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. 현재 국내의 765[kV] 변압기 예방진단시스템을 보면 변압기 외함에 12개의 초음파 센서를 부착하고, 부분방전에 의한 초음파 신호를 변압기의 운전 중에 상시 측정하여 부분방전의 발생 여부와 영역적인 발생 위치를 판단하고 있다[2]. 하지만 전력용 변압기에 다수의 초음파 센서를 변압기 외함에 부착하더라도 양쪽 면의 초음파 센서쌍에서는 변압기 내의 구조물로 인한 감쇄된 부분방전 신호가 측정되어 기존의 위치 추정법으로는 정확한 위치추정이 어려운 실정이다. 따라서 본 논문에서는 다수의 센서가 부착된 변압기에서 부분방전이 발생한 위치와 가장 가까운 쪽의 외벽에 부착된 초음파 센서만으로 유증 및 변압기 외함에서의 초음파 신호의 전달특성을 이용하여 위치를 추정하는 방법을 제안하고 신경회로망을 이용 효과적으로 위치를 추정하였다.

모의 변압기에서 전압을 직접 인가하여 부분 방전을 발생시켰고, 실제 발생 위치와 제안한 방법으로 추정한 위치를 비교하여 제안한 위치 추정 알고리즘의 효용성을 입증하였다.

2. 초음파 신호의 전달특성

초음파 신호는 일반적으로 변압기 외벽(steel)과 변압기 유(oil)를 통과한 신호가 합쳐져 초음파 센서에 전달된다. 초음파 신호는 매질에 따라 전파속도가 다르므로 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 전달 특성을 알아보기 위해 그림 1과 같이 부분 방전원에 법선인 지점과 이로부터 30cm 떨어진 지점에 각각 초음파 센서 sensor1과 sensor2를 부착하여 초음파 신호를 동시에 취득하였다.

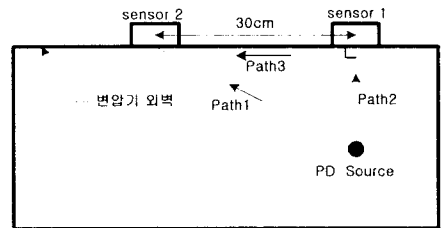


그림 1. 경로에 따른 초음파 신호의 전달 특성

그림 2는 법선방향에 부착한 센서(sensor1)에서 검출된 초음파 신호이며 그림 1의 부분방전원에서 sensor1까지의 직접적인 경로 Path2만을 통과하여 센서에 도달하게 된다.

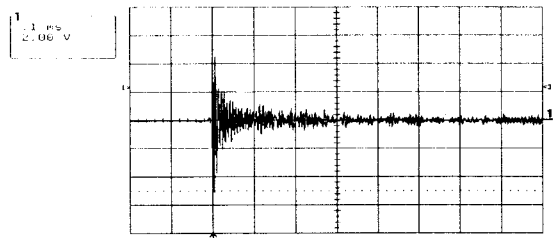


그림 2. 법선방향에 부착된 sensor1에서 검출된 초음파 파형

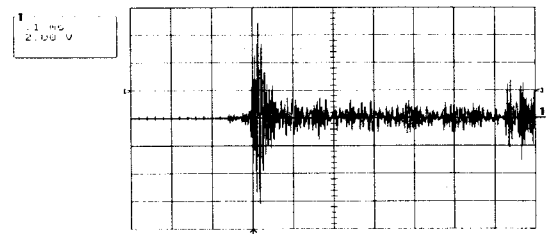


그림 3. sensor2에서 검출된 초음파 파형

그림 3은 법선 방향에서 30cm 떨어진 sensor2에서 검출된 신호이며 이는 부분방전원에서 sensor 2까지의 직접적인 경로 Path1과 유중을 통과한 후 외벽을 통과하는 전달경로(Path2+Path3)를 통하여 센서에 도달하게 된다. 결국 변압기 외함에서의 초음파 전파속도가 유중에서보다 약 4배정도 빠르므로 변압기 외함을 통과한 감쇄된 신호가 유중을 통과한 신호보다 먼저 sensor 2에 도달하게 된다[3,4]. 그림 3에서 변압기 외함을 통과하여 oil을 통과한 신호보다 먼저 센서에 도달하는 감쇄된 신호부분을 헤더 신호(header signal)라고 하며, 이러한 헤더신호와 변압기 유 및 외함에서의 초음파 전달 특성을 이용하여 부분방전의 위치 추정에 적용시킬 수 있다[5,6]. 하지만 기존에 제시되었던 이러한 방법은 헤더신호 부분이 zero에 가까운 최소인 지점을 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.

3. 초음파 신호를 이용한 부분방전 위치 추정

3.1. 기하학적 기법을 이용한 위치 추정 알고리즘

한쪽 면의 센서들로 부분 방전원 위치를 추정하기 위해 부분 방전원에서 변압기 한쪽 면에 법선인 지점과 이로부터 각 센서까지의 거리를 구해야 한다. 이를 위해 변압기 한쪽 면에 초음파 센서가 부착되고 변압기 내에 부분방전이 발생한다고 가정하여 위치추정에 필요한 수식을 전개하였다.

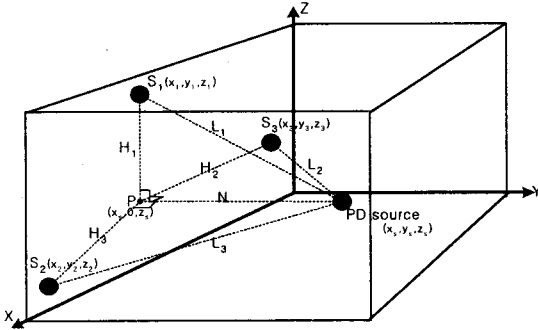


그림 4. 한쪽 외벽(X-Z평면)에 부착된 센서만을 이용한 위치추정

그림에서,

- L_i : 부분방전원에서 초음파센서 (S_i)까지의 거리[mm]
- $P_i(x_i, 0, z_i)$: 부분방전원에서 X-Z 평면에 법선으로 내린 지점의 좌표
- N : 부분방전원에서 P점까지의 거리[mm]
- H_i : P점에서 초음파 센서 i 까지의 거리[mm]
- $S_i(x_i, y_i, z_i)$: 초음파 센서 S_i 의 좌표

그림 4에서 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 를 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 각 초음파 센서에서 검출된 부분방전 신호의 헤더신호 시간과 변압기 외벽에서의 초음파의 전파속도로써 계산될 수 있다.

결국 식(1)의 방정식을 계산하면 P점의 좌표 중 x값 및 z값을 알 수 있으며 X-Z 평면에서 source 까지의 거리(N)만 구하면 최종적인 PD Source의 좌표를 구할 수 있다. 따라서 N의 값을 알기 위해 X-Z평면에서 부

분방전원까지의 거리(N)와 부분방전원에서 각 초음파 센서까지의 거리(L_i) 및 각 센서의 헤더 신호의 길이(H_i)를 이용하면 3개의 직각삼각형을 만들 수가 있으며 이들의 관계식은 식(2)와 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 유중에서의 초음파의 전달 속도(v)를 곱한 값이 되며, 두 신호의 시간차는 상호상관법을 이용하여 계산할 수 있으며 두 신호의 시간차(Δt_{12})가 양의 값일 경우 식(2)는 두 신호의 거리차를 적용하면 식(3)과 같이 정리된다.

$$L_1^2 - H_1^2 = L_2^2 - H_2^2 = (L_2 + \Delta t_{12} \cdot v)^2 - H_1^2 \quad (3)$$

식(3)을 L_2 에 관하여 정리하면 부분방전원으로부터 초음파센서 S_1, S_2 까지의 거리 L_1, L_2 는 다음과 같다.

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

$$L_1 = L_2 + \Delta t_{12} \cdot v \quad (5)$$

따라서 L_i 및 H_i 의 값을 식(2)에 대입하면 N의 값을 알 수 있고 부분방전원의 최종적인 위치를 구할 수 있다.

3.2. 신경 회로망을 이용한 부분방전 위치 추정

신경 회로망으로 부분 방전의 발생 위치를 추정하기 위해 지도 학습의 일종인 다층 구조의 MLP(Multi-Layer Perceptron)를 사용하였다[7]. MLP는 입력층에 각 유닛에 입력패턴을 주면, 이 신호는 각 유닛에서 변환되어 중간층에 전달되고 최후에 출력층에서 신호를 출력하게 된다. 이 출력값과 기대값을 비교하여 차이를 줄여나가는 방법으로 연결강도를 조절하고, 상위층에서 역전파하여 하위층에서는 이를 근거로 다시 자기층의 연결강도를 조정해 나간다. 본 논문에서 위치를 측정하기 위해 신경 회로망의 입력으로 부분 방전원, 부분 방전원으로 부터 법선 방향으로 만나는 점, 각 초음파 센서가 이루는 직각삼각형의 요소를 이용하였다. Header signal의 길이는 부분 방전으로부터 법선 방향으로 변압기 외벽에 내려서 만나는 점(P)과 각 초음파 센서(S_i)의 위치를 가지고 다음 식(6)을 이용하여 구한다.

$$H_i = \sqrt{(x_i - x_p)^2 + (y_i - y_p)^2 + (z_i - z_p)^2} \quad (6)$$

여기서,

H_i : P점에서 초음파 센서 i 까지의 거리($i=1,2,3$)

x_p, y_p, z_p : 부분방전원에서 법선 방향으로 내려서 만나는 점 P의 x, y, z 값

x_i, y_i, z_i : 초음파 센서 i 의 x, y, z 좌표값 ($i=1,2,3$)

식(6)를 통해 얻은 H_i 를 이용하면 L_i 사이의 거리는 다음 식(7)을 이용하여 구할 수 있다.

$$L_{ij} = \sqrt{H_i^2 + y_s^2} - \sqrt{H_j^2 + y_s^2} \quad (7)$$

여기서, x_s, y_s, z_s : 부분방전원의 x, y, z의 좌표값

L_{ij} : L_i 과 L_j 의 거리차

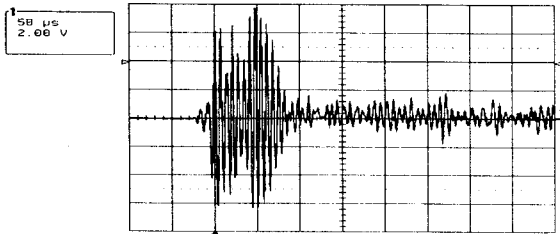
이 때 직각삼각형의 요소로 이루어진 입력을 이용하여 MLP 신경 회로망은 전력용 변압기 내의 부분 방전 발생 위치를 출력으로 나타낸다.

4. 사례연구

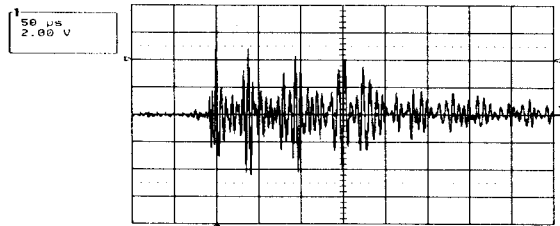
4.1. 3개의 초음파 센서에서 검출된 부분방전 신호

앞에서 제시한 위치 추정 알고리즘을 이용하여 실제의 부분방전 발생점을 검출하기 위해 모의변압기(650[mm]×650[mm]×800[mm])내에 침 대 평판 전극을 설치하고, 변압기 한 쪽 외벽(X-Z평면)에 150[kHz] 공진 주파수를 갖는 DECI사의 SE 150-RI 협대역 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 $S_1(325, 0, 260)$, $S_2(500, 0, 70)$, $S_3(140, 0, 70)$ 이었다.

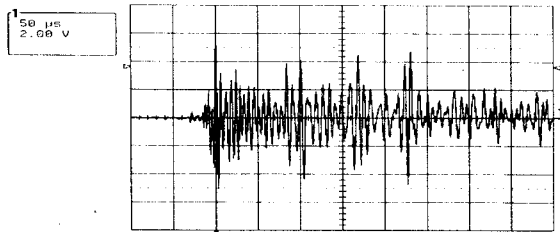
그림 5는 변압기의 한쪽 외함(X-Z평면)에 부착된 3개의 초음파 센서에서 측정된 부분방전 신호를 나타낸다.



(a) 초음파 센서(S_1)에서 측정된 초음파 신호



(b) 초음파 센서(S_2)에서 측정된 초음파 신호



(c) 초음파 센서(S_3)에서 측정된 초음파 신호

그림 5. 3개의 초음파 센서에서 검출된 초음파 신호

그림 5를 보면 각각의 초음파 센서에 Header signal part가 발생함을 알 수 있다.

4.2. 신경 회로망을 이용한 부분방전 위치 추정 결과

신경 회로망의 훈련 예제는 변압기에서 나타날 수 있는 X, Y, Z좌표 방향을 50[mm] 간격으로 등분하여 신경 회로망의 훈련 예제를 작성하였다. 신경 회로망의 입력에 사용된 변압기의 범위는 표 1과 같다.

표 1 등분된 변압기의 실제 범위

좌표	범위[mm]
X 좌표	50 ~ 600
Y 좌표	50 ~ 300
Z 좌표	50 ~ 250

표 2는 모의 변압기의 부분 방전 위치 예측을 위해 학습시킨 신경 회로망의 구조 및 파라메타 값을 나타내

며, 표 3은 모의 변압기 내에서 시행한 사례 연구의 결과이다.

표 2 변압기에 대한 신경 회로망의 파라메타

구분	학습 결과 및 주요 계수
입력층의 노드수	3
은닉층의 노드수	30
출력층의 노드수	3
훈련 예제의 수	360
학습률 계수	0.7
모멘텀 계수	0.5
수렴 반복 횟수(학습 횟수)	311.547
수렴 오차(최대 오차)	0.005

표 3 변압기의 사례 연구 결과 단위 : mm

	X	Y	Z	거리오차
발생위치	325	200	120	24
신경망 결과	313	182	109	

표 3에서 보는 것과 같이 실제 위치와 신경 회로망으로 학습시켜 얻은 위치는 다소 차이가 있으나 이러한 차이는 헤더 신호의 시간측정 및 외함에서의 초음파 속도 등에서 발생할 수 있으며, 이러한 오차는 보완할 수 있으므로 대형화되어 가는 실제 변압기에서 보다 정확하고 신뢰성 높은 위치를 추정할 수 있을 것으로 기대한다.

5. 결 론

본 연구에서는 변압기내의 유증 및 변압기 외함에서의 초음파 전달특성을 이용하여 변압기의 한쪽 외함에 부착한 초음파 센서만으로 부분방전원의 위치를 검출할 수 있는 방법을 제안하였다. 전력용 변압기의 대형화에 따라 부착되는 초음파 센서의 수가 증가되었지만 변압기내의 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 제시하고 신경 회로망을 이용하여 위치를 추정하였다. 헤더신호의 측정과 외함에서의 전달속도에 대한 연구가 앞으로 진행된다면 보다 신뢰성 있는 위치추정을 할 수 있을 것으로 기대된다.

(참고 문헌)

- [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] L.E.Lundgarrd et.al., "Partial Discharge-Part XIV : Acoustic Partial Discharge Detection Practical Application" IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol.8, No.5, pp.34~43, 1992
- [4] Hu Xiaoyun et.al., "PD detection and localization by acoustic measurement in an oil-filled transformer" IEE Pro.-Sc.Meas.Technol., Vol. 147, No.2, pp.81~85, 2000
- [5] D W Aucland et.al., "The ultrasonic Location of Discharge in Transformers-A New approach", Conference Record of the 1994 IEEE International Insulation, Pittsburgh, PA USA, pp.77~78, 1994
- [6] 박희로, 진상범 외, "변압기내에서 초음파 신호의 전달 경로에 의한 위치 추정 기법", 대한전기학회 춘계학술 대회 논문집, pp.285~287, 1999
- [7] Y.H.Yoon, J.C.Kim, "A Neural Network Approach for On-Line Estimation of Partial Discharge Location in Power Transformer Using Advanced Correlation Technique", Proceeding ISAP'96, pp.316~320, 1996