

# 신경망을 이용한 전력용 변압기의 부분방전 위치추정

김재철\*, 윤용한, 김영식, 권동진  
 송실대학교 전기공학과

## Estimation of The Partial Discharge Position Using Neural Networks in The Power Transformers

Jae-Chul Kim, Yong-Han Yoon, Young-Sik Kim, Dong-Jin Kweon  
 Dept. of Electrical Engineering, Soongsil University

### Abstract

This paper presents a new method for estimating partial discharge position using improved cross-correlation technique and neural networks in the power transformer. When ultrasonic signal is occurred by partial discharge, we detected these signals and calculated cross-correlation values with Hamming window. Also, we estimated partial discharge position using neural network with cross-correlation values. In the result of case study, we can estimate more accurately the partial discharge position than any other algorithms.

### 1. 서론

전력계통의 고신뢰도 운용을 위한 전력용 변압기의 상시감시 및 예방진단 기술이 국내외에서 다수 개발되고 있다. 그 중 변압기내 부분방전의 위치를 추정하기 위한 방법은 전기신호-초음파신호 측정법과 초음파신호-초음파신호 측정법(이하 초음파 측정법)이 있다. 전기신호-초음파신호 측정법은 부분방전의 발생과 동시에 로고우스키코일(Rogowski-coil)에서 감지되는 전기신호와  $\Delta t$ 의 시간지연 후 초음파 센서에서 감지되는 초음파 신호의 시간차를 이용하는 방법이다. 그러나 이 방법은 변압기 외부의 부분방전에도 전기신호가 발생하는 단점이 있다. 초음파 측정법은 부분방전이 발생하는 초음파 신호를 2개 이상의 초음파 센서에서 감지한 후, 시간차를 거리로 환산하여 부분방전 발생위치를 추정하는 방법이다. 따라서 부분방전이 발생하는 전기신호에 영향을 받지 않고, 초음파 센서등과 같은 간단한 장치로 위치추정이 가능하기 때문에 유용하다. [1-5]

초음파 신호에 의한 부분방전 위치추정법은 작도법, Newton-Raphson법에 의한 해석기법등이 있다. 그러나 이와 같은 방법은 측정된 신호에 오차가 많이 포함되어 있으면 부분방전 발생 위치가 허상으로 나타나거나, 해를 구할 수 없는 경우가 나타난다. [4,5]

본 논문에서는 센서에서 측정된 초음파 신호에 대하여 해밍 창을 적용한 상호상관법을 도입하여 거리의 오차를 최소화하였으며, 이때의 거리를 신경회로망에 적용하여 부분방전 위치를 추정하였다. 신경회로망은 모의변압기(800×500×400[mm])내

부분방전 발생 가능한 위치를 X, Y, Z축 방향으로 각각 5[cm] 간격으로 등분하여 각 위치에 대하여 지도학습시켰으며, 모의 변압기내에서 발생한 부분방전에 따라 3개의 거리가 입력되면 부분방전의 발생위치를 추정할 수 있다. 그 결과 센서에서 측정된 초음파 신호가 다소 오차를 포함할지라도 근사치에 가까운 위치를 찾아낼 수 있다.

### 2. 부분방전에 의한 초음파 신호의 검출

본 논문에서 사용한 초음파 측정장치의 구성도는 그림 1과 같고, 그림 2와 같이 모의변압기 외벽에 3쌍(6개)의 초음파 센서(US<sub>1</sub>~US<sub>6</sub>)를 부착한 후, 각 센서상에 도달하는 초음파 신호의 시간차를 이용하여 거리를 추정하였다. 측정된 초음파 신호는 그림 3과 같다.

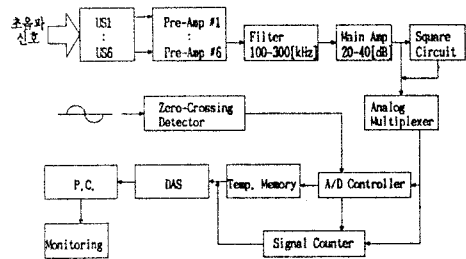


그림 1. 초음파 측정장치의 구성도

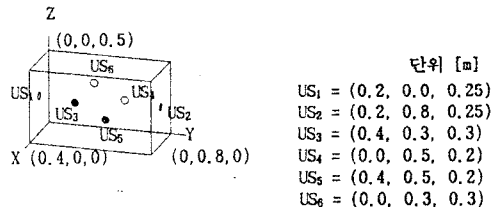


그림 2. 모의변압기에 부착된 초음파 센서의 위치

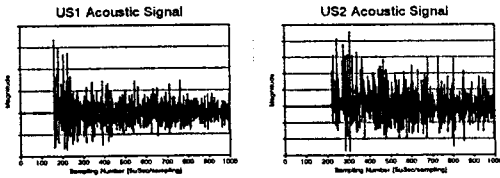


그림 3. 측정된 초음파 신호

초음파신호 측정법은 부분방전의 발생이 시간영역의 어느 위치를 기준하느냐에 따라 오차의 크기가 결정된다. 이를 보완하기 위하여 상호상관법이 제안되었으나 기존의 상호상관법은 변압기내 초음파 전파에 따른 잔향효과, 반사파 등에 의한 오차로 정확한 상호상관값 계산이 어려웠다. 그러므로 본 논문에서는 해밍창을 이용하여 상호상관값의 정확도를 개선하였다. 그림 3과 같이 부분방전 발생점에서 각 센서에 도달한 신호는 첫 윤곽이며, 그 뒤의 연속되는 신호는 잔향과 반사파에 의한 영향이다. 그러므로 각 센서쌍에서 측정된 신호의 상호상관값은 첫 윤곽을 겹잡은 후, 두 신호간의 상호상관값을 계산함으로써 가능하다. 첫 윤곽의 설정을 위해서는 부분방전 개시시간의 설정이 필요하다. 부분방전 개시시간의 설정은 측정된 초음파 신호의 창함수 평균값을 구한 후, 그 평균값과 창함수 직후의 표준화 값의 크기비교시 일정배수 이상일 때의 표준화 값을 부분방전 개시시간으로 간주한다. 부분방전 개시시간이 결정되면 개시시간 주위에 새로운 해밍창을 취하고, 나머지는 0으로 한 후 동일한 과정을 반복한다. 해밍창 함수의 수식적 표현은 식 (1)과 같고, 두 초음파 신호의 상호상관계수  $R_{xy}(k)$ 는 식 (2)와 같다. [6, 7]

$$H(k) = 0.54 + 0.46 \left[ \cos \left( -\frac{2\pi k}{M-1} \right) \right] \quad (1)$$

$$R_{xy}(k) = \frac{1}{M-k} \sum_{n=0}^{M-k-1} x(n)y(n+k) \quad (2)$$

여기서, M : 측정된 초음파 신호의 길이

그림 4는 측정된 초음파 신호에 해밍창을 의운 후의 상호상관값을 나타낸 것이다.

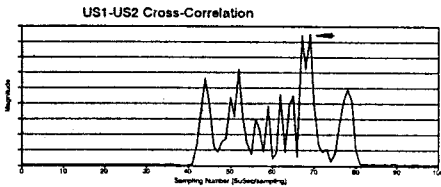


그림 4. 측정된 초음파 신호의 창함수에 의한 상호상관값

### 3. 신경망을 이용한 부분방전 위치추정

부분방전 발생시 초음파 신호는 초음파 센서를 통해 측정된 후 A/D 변환되어 호스트 컴퓨터에 전송된다. 호스트 컴퓨터는 전송된 초음파 신호로써 상호상관관계를 이용하여 시간차를 구한 후, 역전파 알고리즘의 신경회로망에 시간차가 거리차로 환산된 값을 입력으로 사용하여 부분방전 발생위치를 추정한다. 본 논문에서 부분방전의 발생위치를 추정하기 위한 전체적인

구성은 그림 5와 같다.

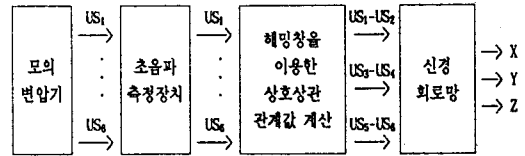


그림 5. 부분방전 발생위치 추정을 위한 구성도

### 3-1. 신경회로망의 적용

부분방전의 위치추정을 위한 기존의 알고리즘은 수학적으로 해석하여 처리하였다. 그러나 비선형 특성이 포함되어 있고, 부분방전의 측정결과가 오차를 내포하고 있다면 처리가 곤란하다. 따라서 본 논문에서는 측정된 초음파 신호의 오차를 해밍창함수의 적용으로 최소화한 후, 신경회로망을 도입하여 부분방전의 발생위치를 추정하였다. 사용한 신경회로망은 지도학습의 일종인 다층구조(multi-layer structure)의 역전파 알고리즘을 선택하였다.

신경회로망의 학습은 모의변압기를 X, Y, Z축 방향으로 각각 5[cm] 간격으로 등분하여 학습시켰으며, 각 쌍의 초음파 센서 간 거리치를 신경회로망의 입력으로 사용하고, 출력은 X, Y, Z 좌표로 구성하였다. 신경회로망의 기본적인 구조는 표 1과 같고, 학습은 SUN SPARC 10에서 수행하였다.

표 1. 부분방전 위치추정을 위한 신경회로망의 구조

구분	학습결과 및 주요계수
입력층의 노드수	3
은닉층의 노드수	30
출력층의 노드수	3
훈련예제의 수	325
학습률 계수	0.7
모멘텀 계수	0.5
수렴반복횟수(학습횟수)	982,649
수렴오차(최대오차)	0.005

### 3-2. 위치추정을 위한 학습예제의 도출

부분방전 발생위치를 추정하기 위한 신경회로망의 학습예제는 그림 2와 같이 3쌍(6개)의 초음파 센서를 모의변압기 외벽에 부착하여 식 (3)과 같이 계산하였다.

$$d_{1,2} = \sqrt{(x_p - x_1)^2 + (y_p - y_1)^2 + (z_p - z_1)^2} - \sqrt{(x_p - x_2)^2 + (y_p - y_2)^2 + (z_p - z_2)^2} \quad (3)$$

여기서,  $d_{1,2}$  : 센서  $US_1$ 과  $US_2$ 의 거리차

$x_p, y_p, z_p$  : 부분방전 발생위치의 좌표

$x_1, y_1, z_1$  : 센서  $US_1$ 의 좌표

$x_2, y_2, z_2$  : 센서  $US_2$ 의 좌표

센서  $US_3$ 와  $US_4$ 의 거리차  $d_{3,4}$  및 센서  $US_5$ 와  $US_6$ 의 거리차  $d_{5,6}$ 도 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

본 논문의 부분방전 위치를 추정하기 위한 신경회로망의 학

습예제는 모두 325개로 표 2와 같다. 학습예제의 작성은 모의 변압기의 X, Y, Z축 모두를 5[cm] 간격으로 등분하지 않고, 모의 변압기 내부의 본체 위치를 측정하여 필요한 부분만 등분하였다. 5[cm] 간격으로 등분된 모의 변압기의 실제 범위는 표 2와 같다. 신경회로망의 학습에 이용된 학습예제는 표 3과 같다.

표 2. 등분된 모의 변압기의 실제 범위

좌표축	범위[m]
X 축	0.10 - 0.30
Y 축	0.10 - 0.70
Z 축	0.15 - 0.35

표 3. 신경회로망의 학습에 이용된 학습예제

번호	거리차			표표값		
	US <sub>1</sub> -US <sub>2</sub>	US <sub>3</sub> -US <sub>4</sub>	US <sub>5</sub> -US <sub>6</sub>	X, Y, Z		
1	-0.540	-0.024	0.232	0.100	0.100	0.150
2	-0.558	-0.038	0.255	0.100	0.100	0.200
3	-0.565	-0.051	0.273	0.100	0.100	0.250
4	-0.558	-0.063	0.286	0.100	0.100	0.300
5	-0.540	-0.074	0.292	0.100	0.100	0.350
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

### 3-3. 학습된 신경회로망을 이용한 사례연구

학습된 신경회로망을 이용하여 부분방전의 위치를 측정할 결과, 모의 변압기의 외벽에 가까울수록 오차가 커짐을 알 수 있다. 그 이유는 모의 변압기 외벽에 가까울수록 비선형 특성이 커지므로 신경회로망의 수렴정도가 떨어지기 때문이고, 이것은 신경회로망의 학습예제를 더 세밀하게 분할하거나 학습횟수를 증가시키면 해결될 수 있다. 하지만 실제 모의 변압기의 외벽에서는 부분방전이 일어날 경우가 거의 없고, 현재 학습된 신경회로망의 허용오차는 무시될 수 있는 정도의 짧은 거리이므로 신경회로망은 부분방전 발생위치 추정에 적합하다. 그림 6은 각 센서상에서 측정된 초음파 신호로써 거리차를 구하기 위해 해밍창함수가 적용된 상호상관의 결과이다. 이때, 부분방전의 발생위치는 (0.095, 0.655, 0.210, 단위[m])이고, 각 센서상에 의한 거리차가 신경회로망의 입력으로 사용된다. 표 4는 부분방전의 발생위치를 변경시키면서 시행한 사례연구의 결과이다.

### 4. 결론

본 논문에서는 모의 변압기 내에서 부분방전이 발생하였을 경우, 초음파 신호가 각 센서에 도착하는 시간차를 이용하여 거리차를 구할 때 정확도를 개선하기 위하여 해밍창함수를 이용한 상호상관 이론을 도입하였다. 즉, 신호의 오차를 최소화하면서 각 센서에서의 거리차를 구한 후, 이 거리차를 신경회로망에 적용하여 부분방전의 발생위치를 추정하였다. 적용한 신경회로망은 학습시간이 오래걸린다는 단점은 가지고 있으나, 한번 학습된 후에는 부분방전의 위치추정이 다른 알고리즘에 비해 빠르면서 근사치에 가깝게 추정할 수 있다. 사례연구 결과 신경회로망을 이용한 부분방전의 위치추정은 학습결과에 따라 결정되며, 신경회로망이 충분히 학습되었다면 부분방전 위치를 비교적 정확하게 추정할 수 있다. 즉, 실변압기에의 적용도 가능하리라 생각된다.

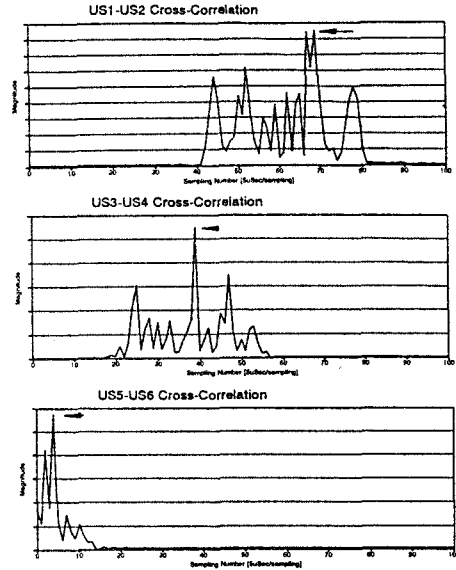


그림 6. 해밍창함수가 적용된 상호상관의 결과

표 4. 모의 변압기 내의 부분방전 사례연구

좌표 [m]	부분방전 발생위치	상호상관에 의한 센서간의 거리차 [m]			신경회로망의 출력결과 [m]	거리 오차 [m]
		X	Y	Z	X	
사례 연구1	X	d <sub>1,2</sub>	d <sub>3,4</sub>	d <sub>5,6</sub>	X	0.05
	Y	US <sub>1</sub> -US <sub>2</sub>	US <sub>3</sub> -US <sub>4</sub>	US <sub>5</sub> -US <sub>6</sub>	Y	
	Z				Z	
사례 연구2	X	0.095	0.481	0.295	-0.036	0.099
	Y	0.655	0.483	0.273	-0.028	0.655
	Z	0.210				0.260
사례 연구3	X	0.210	-0.049	-0.006	-0.029	0.222
	Y	0.375	-0.056	-0.014	-0.042	0.372
	Z	0.175				0.159
사례 연구3	X	0.155	-0.285	-0.059	0.201	0.148
	Y	0.255	-0.294	-0.063	0.217	0.248
	Z	0.305				0.330

### 참고문헌

- [1] J.G.Andeson, "Ultrasonic Detection and Location of Electrical Discharges in Insulation Structures," *AIEE Trans, Vol.75, No.3, pp.1193-1198*, Dec 1956.
- [2] E.Howells and E.T.Norton, "Detection of Partial Discharge in Transformers Using Acoustic Emission Techniques," *IEEE Trans on PAS, Vol.PAS-97, No.5, Sept/Oct 1978*.
- [3] E.Howells and E.T.Norton, "Location of Partial Discharge Sites in On-Line Transformers," *IEEE Trans on PAS, Vol.PAS-100, No.1, pp.158-161*, Jan 1981.
- [4] 김재철 외, 전력설비의 사고예방 및 진단 시스템의 개발, 기초전력공학공동연구소, 1992.10
- [5] 정완섭 외, "모의 변압기에서 초음파신호의 상호상관에 의한 부분방전 위치추정," *대한전기학회 춘계학술발표회 논문집*, 1993.5.
- [6] N.K.Boss, *Digital Filters Theory and Designs*, Elsevier Science Publishing Co. Inc, 1985.
- [7] 박형준, 정찬수 외, "PD 위치검출을 위한 초음파 PD 신호의 상호상관 계산기법," *제10회 음성통신 및 신호처리 워크샵 논문집*, 한국음향학회, 1993.8.