2001년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2001.7.18-20

변압기 부분방전 위치검출을 통한 진단알고리즘 개발

이승환* 오학준* 신승식* 윤만수** 정찬수*
숭실대학교* 정수기능대학**

Development of Diagnostic Algorithm Using Location of PD at Transformer

Seung-Whan Lee* Hak-Joon Oh* Seung-Shik Shin* Man-Soo Yun** Chan-Soo Jung*
Soongsil University* JungSoo Polytechnic College**

Abstract - This paper is the study for the separating noise signal that is the greatest problem in ultrasonic signal measurement which is one of the method of estimation of partial discharge signals location. Because we can measure the number and location of signal, it is possible to distinguish between the signal of partial discharge and the external noise. Therefore, we can develop the credibility of detecting of insulating deterioration in transformer.

1. 서 론

변압기에서 발생하는 부분방전의 위치추정은 변압기 절연열화를 측정하는데 있어 센서에 유입된 신호가 외부 잡음인지 내부에서 발생한 신호인지를 구별함으로서 초음파측정을 통한 변압기 절연열화 진단의 신뢰성을 높일 수 있는 방법이다. 본 논문은 변압기에서 발생하는 부분방전 신호를 검출하고 그 위치를 추정하여 변압기 이상유무를 판단하는 기본자료를 제공한다. 변압기 부분방전의 위치를 추정하는 방식으로 사용되었던 방식들은 신호원이 한 개 발생했을 때 그 위치를 잘 추정하였다. [5] - [8] 기존의 방식들은 신호원이 한 개일 때는 문제가 없지만 신호원이 다수개일 경우에는 그 적용이 어려웠다. 이 문제를 해결하기 위해서 제안된 방식으로 센서배열을 이용한 부분방전원 위치추정기법은[1][2] 다 수개의 부분 방전원이 발생할 시에도 그 적용이 가능하다. 본 논문에서 이 방법을 이용하여 그림2와 같은 실험 장치를 구성하여 알고리즘의 검증실험을 한다.

2. 본론

2.1 변압기 부분방전위치 추정 알고리즘

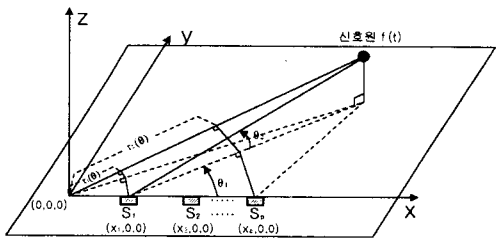

그림 1. 센서배열과 방향각
Fig. 1 Sensor Array and direction angle

그림1과 같이 등 간격으로 배치된 센서배열에 유입되는 신호를 식 (1)처럼 자기 상관행렬을 구성하였다.

$$C_x(\omega) = E[\boldsymbol{x}(\omega)\boldsymbol{x}(\omega)^H] \tag{1}$$

$\boldsymbol{x}(\omega)$는 센서에 유입된 신호의 푸리에변환이며, 자기 상관행렬 $C_x(\omega_k)$행렬의 고유값은 양의실수이며 식 (2)처럼 순서를 정할 수 있다.

$$\lambda_1(\omega_k) \geq \cdots \geq \lambda_r(\omega_k) > \sigma(\omega_k)^2 \geq \lambda_{r+1}(\omega_k) \geq \cdots \lambda_p(\omega_k) \tag{2}$$

신호원 개수를 q, 센서의 수를 p, $p>q$, 고유치중 $p-r$개는 $\sigma(\omega_k)^2$과 같거나 작고, r개는 $\sigma(\omega_k)^2$보다 크다. 각 $\omega_k(k=1,\cdots,N)$에서 구한 r 중 가장 큰 값을 신호원 개수 $\hat{q}$로 결정한다.

$$\hat{q} = \max[r(\omega_1),\ r(\omega_2),\ \cdots,\ r(\omega_N)] \tag{3}$$

2-2. 신호원 위치 추정

센서에 유입된 신호 의 퓨리에 변환 $\boldsymbol{x}(\omega)$는 식(4)와 같이 정의 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \boldsymbol{x}(\omega) &= \sum_{n=1}^{q} f_n(\omega)\ \boldsymbol{s}_n(\omega, \theta) + \eta(\omega) \\ &= S(\omega, \theta_c) f(\omega) + \eta(\omega) \end{aligned} \tag{4}$$

식 (4)에서 $f(\omega)$는 $q\times1$벡터로 신호원의 푸리에변환이며, $\eta(\omega)$는 센서에 혼입된 잡음으로 $p\times1$벡터이다. $S(\omega, \theta_c)$는 $p\times q$ 합성조정행렬(Composite steering matrix)로서 각각의 신호원에 관계된 q개의 조정벡터열로 식 (5)처럼 구성된다.

$$S(\omega, \theta_c) = [s_1(\omega, \theta_1) \vdots s_2(\omega, \theta_2) \vdots \cdots \vdots s_n(\omega, \theta_q)] \tag{5}$$

식(5)에서 $s(\omega, \theta)$는 조정벡터로서 식 (6)처럼 $p\times1$ 벡터로 표현된다.

$$s(\omega, \theta) = \begin{bmatrix} \exp(-j\omega\tau_1(\theta)) \\ \vdots \\ \exp(-j\omega\tau_p(\theta)) \end{bmatrix} \tag{6}$$

그림 1과 같이 센서를 x축에 배열하면 상대 시간지연 $\tau_m(\theta)$은 식 (7)와 같다.

$$\tau_m(\theta) = \frac{1}{v} x_m \cos(\theta_1)\cos(\theta_2) \tag{7}$$

식 (7)에서 v는 부분방전 신호원의 유중 전파속도이다.

부분방전 신호의 유중 전파속도는 온도에 따라 변화하는데 변화 그래프는 [참고 7]을 이용하였다. 상대 시간지연 $\tau_m(\theta)$은 초음파 신호가 신호원에서 원점까지 도달하는데 소요되는 시간과 각 센서까지 도달하는데 소요되는 시간과의 차이이다. 식(4)와 같은 신호원 모형에 대한 모델오차는 다음 식과 같이 정의 할 수 있다.

$$e(\theta_c, \omega, f(\omega)) = x(\omega) - S(\omega, \theta_c) f(\omega) \qquad (8)$$

오차를 정의한 위 식을 이용하여 다음과 같은 평가함수를 정의할 수 있다.

$$J(\theta_c, \omega, f(\omega)) = \| x(\omega) - S(\omega, \theta_c) f(\omega) \|_2^2 \qquad (9)$$

식 (9) 최소화하는 신호원들의 방향벡터 θ_c를 추정하기 위하여 SB(Sequential Beamforming)알고리즘을 사용하였다.[9]

3. 실험 및 결과

위치추정알고리즘의 구현을 위하여 그림 2와 같이 실험장치를 구성하였다.

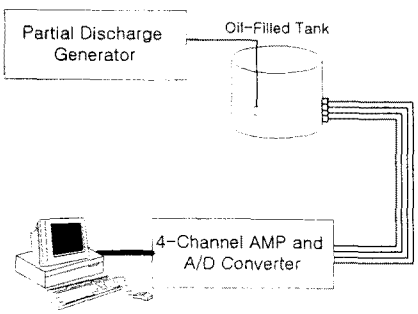

그림 2. 실험장치 개념도
Fig 2. Conception of experimentation

실험장치는 센서배열을 모형변압기의 외벽에 부착하고 모형변압기내에 부분방전을 임의의 위치에서 발생시키도록 구성되었다. 4개의 센서로 구성된 센서배열에서 유입된 신호를 대역통과 필터(100㎑ ~ 300㎑) 및 엠프(40dB)를 거쳐 A/D변환하여 컴퓨터에 저장하고 저장된 데이터를 이용하여 제안된 위치추정알고리즘을 적용하였다. A/D시 샘플링 주파수는 2.5㎒로 샘플링 하였으며 각 센서마다 데이터의 수는 15000개를 저장하였다. 위치추정 알고리즘에서 위에서 저장한 전체 데이터를 모두 사용하지 않고 신호발생지점 부근의 1024개의 데이터를 사용하여 위치를 추정한다. 실험 내용은 신호원이 한 개일 경우 와 신호원이 2개일 경우에 대하여 시행하였다.

3-1 부분방전 신호원이 한 개인 경우

신호원이 한 개 발생한 경우에 대한 실험은 모형변압기 내의 신호원으로 초음파진동자를(256, 243)(단위: ㎜)에 위치하고 변압기 외벽에 센서군을 6곳에 부착하여 실험하였다. 표1은 부분방전 위치추정알고리즘을 사용하여 구한 각 센서군에서 구한 방향각과 실제 신호원과 센서군을 계산하여 구한 실제각을 나타내었다. 구해진 방향각들을 이용하여 방향각을 직선으로 표현하면 이 직선들은 이상적으로는 신호원이 한 개일 경우 한곳에서 만나야 하는데 실제 추정결과는 어떤 영역으로 표현된다.

표1. 실제각과 추정각 (경우1)

센서군	실제각(degree)	추정각(degree)
A1	37.0107	38
A2	70.0357	84
A3	117.4002	66
A4	59.9667	63
A5	141.6007	96
A6	76.5813	156

표1에서 구한 추정각을 이용하여 직선을 그어주면 아래 그림처럼 교차점들이 생긴다. 표2는 이 교차점들을 나타내었고 교차점들의 평균과 표준편차를 구하여 평균에서 표준편차이상 오차를 보이는 교차점들을 제외하고 결과를 도시하면 그림 3과 같이 표현할 수 있다.

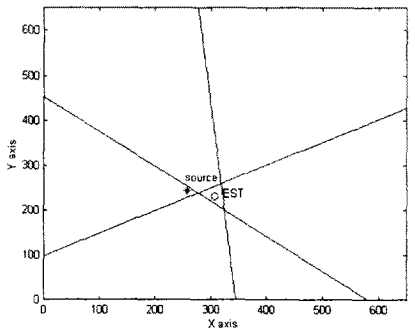

그림 3. 추정결과 (경우1)
Fig 3. Result of Estimation (Case 1)

다음의 표2는 방향각을 이용하여 구한 교차점의 좌표와 이들을 이용한 평균 그리고 표준편차이다.

표2. 교차점의 좌표 와 평균및 표준편차 (경우1)

교차점의 좌표	
x	y
324	200.8
277	237.5
318	256.9
평균	
306.3	231.7
표준편차	
25.6	28.5

신호원의 위치는 (256 , 243)(㎜)인데, 추정된 좌표는 (306 , 231)(㎜)로 추정되었으며 추정결과와 신호원의 실제위치사이의 차가 50㎜ 이내로 추정되었음을 알 수 있으며, 이때 표준편차가 (25.6, 28.5)(㎜)이다.

3-2 부분방전 신호원이 2개인 경우

신호원이 두 개 발생한 경우에 대한 실험으로 모형변압기 내에 두 개의 초음파진동자를 이용하여 신호를 발생시킨다. 이때 신호원 각각의 위치는 s1(256, 243), s2(360, 140)(단위:㎜)이며 신호원이 한 개인 경우와 같은 위치에 센서군을 부착하여 실험하였다. 표3은 부분방전 위치추정알고리즘을 사용하여 구한 각 센서군에서 구한 방향각과 실제 신호원과 센서군을 계산하여 구한 실제각을 나타내었다. 신호원이 2개이므로 각 센서군에서 추정된 각역시 2개로 되어있다.

표3. 실제각과 추정각 (경우2)

실제각(degree)		추정각(degree)	
37	32	38	38
70	96	68	83
117	149	35	136
60	83	38	140
142	140	48	149
76.5	55.5	178	54

표3에서 구한 추정각들을 이용하여 부분방전의 위치를 추정하는데 추정각이 2개이므로 각각을 나누어서 이후 과정에서 처리한다.

3-2-1 신호원1에 대한 방향각 추정결과

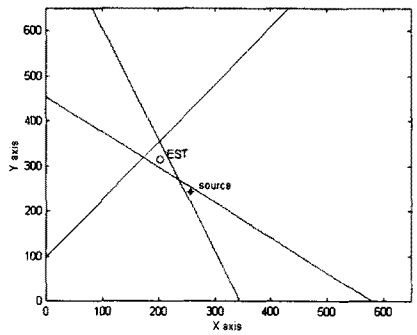

그림 4. 추정결과 (경우2-1)
Fig 4. Result of Estimation (Case2-1)

이때 방향각들이 교차점의 좌표는 다음표와 같다

표4. 교차점의 좌표 와 평균및 표준편차(경우2-1)

교차점의 좌표(㎜)	
236	269.5
173	318.8
202	353.9
평균(추정위치)(㎜)	
203.7	314.1
표준편차	
31.5	42.39

신호원의 위치는 (256, 243)(㎜)인데, 추정된 좌표는 (204, 314)(㎜)로 추정되었으며 이때 표준편차가 (31.5, 42.39)(㎜)이다.

3-2-2 신호원2에 대한 방향각 추정결과

표5. 교차점의 좌표 와 평균및 표준편차 (경우2-2)

교차점의 좌표(㎜)	
320	203.9
331	195.3
389	150
322	187.3
263	129.4
평균(추정위치)(㎜)	
325	173.2
표준편차	
44.75	31.97

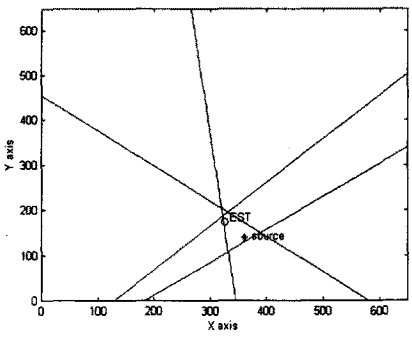

그림 5. 추정결과 (경우2-2)
Fig 5. Result of Estimation (Case2-2)

교차점의 좌표는 표5와 같고 이들의 평균과 표준편차를 구해서 평균에서 표준편차이상 오차를 보이는 결과를 제외하고 다시 얻은 결과로 그림 5 과 같이 도시할 수 있다. 결과 신호원의 위치는 (360, 140)인데, 추정된 좌표는 (325, 173.2)로 추정되었으며 이 경우 역시 50㎜이내의 오차를 보이며 이때 표준편차가 (44.75, 31.97)이다.

4. 결론

위의 실험에서 사용된 모형 변압기는 크기가 (가로×세로) 650×650(㎜)인데 신호원이 한 개인 경우는 표준편차가 (25.57, 28.49)(㎜)였으며, 신호원이 두 개인경우 표준편차가 (31.5,42.39)(㎜)와 (44.75, 31.97)(㎜)였다.

위의 실험결과 신호원이 한 개인 경우 와 두 개인 경우 모두 신호원의 위치추정이 가능했다. 부분방전의 위치검출을 통한 진단알고리즘의 개발에서 위치검출의 의미는 신호원의 신뢰성을 높이는 효과와 변압기의 고장수리 시 고장 위치를 알 수 있다는 장점을 지닌다. 앞으로의 과제는 현장실증실험을 통한 장비와 알고리즘의 검증이 필요하다.

참 고 문 헌

[1] 이승환 외 3명, "센서배열을 사용한 변압기내 부분방전위치추정", 자동제어학술회의, 1999년 10월

[2] 이승환 외 4명, " *센서배열을 이용한 신호원과 잡음의 분리기술*", 조명설비학회 논문집, 1999년 2월

[3] 정찬수 외, "Rowgoski Coil과 초음파 센서를 이용한 변압기내 부분방전 탐지 및 위치검출", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 1990년 7월.

[4] 곽희로 외, 전력기기 예방진단 기술연구(관리과제), 한국전력기술연구원, 1991년 3월.

[5] 정찬수 외, "개선된 초음파방법에 의한 변압기내 부분방전 위치검출", *Journal of the Institute of Basic Sience and the Industrial Technology Reserch Institute*, Soongsil University, Vol 19, 1989.

[6] 정찬수 외, "상호상관법을 이용한 변압기내의 부분방전 위치추정", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 1992년 7월.

[7] 정완섭 외, "초음파 측정에 의한 변압기내 부분방전 위치추정", 대한전기학회 논문지, 제41권, 11호, pp.1316-1323, 1992년 11월.

[8] 문영재, "상호 상관법을 이용한 변압기내의 부분방전 위치측정", 숭실대학교 석사학위논문, 1993년 2월.

[9] James A. Cadzow, "Multiple Source Location - The Signal Subspace Approach", *IEEE Trans. on ASSP*, Vol. ASSP-38, PP. 1110-1125, July 1990.