

부분 방전의 위치 추정

이 승 환*, 유 치 형, 정 찬 수
 송실대학교 전기공학과

Locating of Patial Discharge

Seung-Hwan Lee*, Chi-Hyung Yu, Chan-Soo Chung
 Department of Electrical Engineering Soongsil University

(Abstract) This paper presents an estimation method of the number of partial discharge(PD) sources and their locations in power transformer. To identify multiple PD sources and their locations, the directions-of-arrival estimation algorithm is employed. The results of simulations shows that the proposed method could be accurately detect the number of PD sources and their locations in power transformer.

처럼 표현한다.

$$X_{ideal}(t) = \begin{bmatrix} f(t - \tau_1(\theta)) \\ f(t - \tau_2(\theta)) \\ \vdots \\ f(t - \tau_p(\theta)) \end{bmatrix} \quad (1)$$

이때, $\theta = [\theta_1, \theta_2]$

$$\tau_p(\theta_1, \theta_2) = \frac{1}{c} [Z_p(1) \cos(\theta_1) \cos(\theta_2) + Z_p(2) \sin(\theta_1) \cos(\theta_2)] \quad (2)$$

1. 서 론

변압기 고장 검출과 예방 시스템에 필요한 부분 방전원의 수와 위치에 대한 정보를 얻고자 할 때, 기존의 방식으로는 한 개 이상의 신호가 동시에 발생할 때는 이들 정보의 정확한 검출이 어려웠다.

본 연구에서는 신호 원이 한 개 이상일 때 부분 방전원의 정확한 검출을 위하여 통신분야에서 많이 쓰이고 있는 DOA(directions-of-arrival)추정 알고리즘을 이용하여 변압기 내부에서 발생하는 부분 방전신호의 수와 그 위치를 추정한다.

2. 부분 방전 위치 추정 문제

2.1 신호원과 모형화 오차

변압기 외벽에 부착된 P개의 센서위치를 Z_1, Z_2, \dots, Z_p 라하면 $Z_m = [Z_m(1), Z_m(2), Z_m(3)]^T$ 은 m번째 센서의 위치가 된다. $Z_m(1), Z_m(2), Z_m(3)$ 는 각각 x, y, z 좌표 값이다. P개의 센서에 유입되는 부분 방전 신호는 식(1)처럼 모형화 할 수 있다. 식(1)에서 $f(t - \tau_p(\theta))$ 는 p번째의 센서에 유입된 신호를 나타내며 $f(t)$ 는 부분 방전 신호원을 나타내고 $\tau_p(\theta)$ 는 부분 방전 신호원이 센서에 도착하는데 걸리는 시간차를 반영한 것으로 DOA 문제를 해결하는데 중요한 요소가 된다. $\tau_p(\theta)$ 는 식(2)

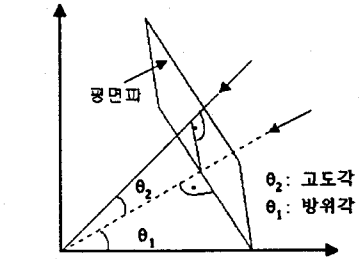


그림 1 평면파의 고도각과 방위각

식(2)에서 θ_1, θ_2 는 부분 방전 신호원의 방위각과 고도각을 나타내며, c는 신호의 전파속도를 나타낸다. 즉, 센서에 부분 방전 신호원이 센서에 도착하는데 걸리는 시간은 방위각과 고도각등으로 결정된다. 그러므로 방위각과 고도각을 알고 시간차를 반영한 $\tau_p(\theta)$ 를 구하면 신호원의 위치를 찾을 수 있다.

센서에 검출된 시간영역의 신호를 정태과정이라고 하고 푸리에 변환 하면 식(3)처럼 표현한다. 식(3)에서 $s(\omega, \theta)$ 는 식(4)처럼 $p \times 1$ 벡터로 표현한다.

$$X(\omega) = \sum_{n=1}^p f_n(\omega) s_n(\omega, \theta_n) + \eta(\omega) \quad (3)$$

$$= S(\omega, \theta_c) f(\omega) + \eta(\omega)$$

$$s_n(\omega, \theta_n) = [e^{-j\omega\tau_1(\theta)}, \dots, e^{-j\omega\tau_p(\theta)}]^T \quad (4)$$

식(3)에서 q 는 부분 방전 신호원의 수이며 $q \times 1$ 벡터 $f_n(\omega)$ 는 신호원의 푸리에 변환이고 $\eta(\omega)$ 는 잡음 벡터이다. $p \times q$ 합성조정벡터(composite steering matrix) $S(\omega, \theta_c)$ 는 각각의 신호원에 관계된 조정벡터의 열로 다음 식(5)과 같이 표현된다.

$$S(\omega, \theta_c) = [s_1(\omega, \theta_1) : \dots : s_q(\omega, \theta_q)] \quad (5)$$

합성조정벡터 $S(\omega, \theta_c)$ 행렬이 비특이 행렬이라 가정하면 모형 오차 벡터는 식(6a)처럼 표현된다.

$$\epsilon(\theta_c, \omega, f(\omega)) = X(\omega) - S(\omega, \theta_c)f(\omega) \quad (6a)$$

식(6a)에 $f(\omega)$ 대신 $\widehat{f(\omega)} = S(\omega, \theta_c)^\dagger X(\omega)$ 를 대입하고 정리하면 식(6b)로 표현된다[5].

$$\widehat{\epsilon}(\theta_c, \omega, \widehat{f(\omega)}) = [I - S(\omega, \theta_c)S(\omega, \theta_c)^\dagger]X(\omega) \quad (6b)$$

$C_x(\omega)e_m(\omega) = \lambda_m(\omega)C_y(\omega)e_m(\omega)$ 를 이용하여 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\epsilon_m(\omega, \theta_c) = [I - S(\omega, \theta_c)S(\omega, \theta_c)^\dagger] \cdot C_y(\omega)e_m(\omega) \quad (6c)$$

여기서 $C_x(\omega)$ 는 APSD(Array Power Spectral Density)행렬이고 $C_y(\omega)$ 는 잡음의 spectral density 행렬이며, $e_m(\omega)$ 는 신호원의 고유벡터이다.

결과적으로 신호원의 수와 위치를 찾는 문제는 식(6c)이 최소가 되도록 합성조정벡터를 구성하는 θ_c 값을 찾는 문제로 귀결된다.

2.2 부분 방전 신호원의 수 결정

합성조정벡터를 구성하는 θ_c 를 구하기 위하여 센서에 유입된 신호를 사용하여 APSD(Array Power Spectral Density)행렬 $C_x(\omega_k)$ 를 구성한다. 신호원의 샘플링한 개수를 L 이라 하고 L 을 Q 등분하였을 때 개수를 N 이라 하면 $C_x(\omega_k)$ 는 식(7)처럼 표현된다[5].

$$C_x(\omega_k) = \frac{1}{Q} \sum_{i=1}^Q X^{(i)}(\omega_k)X^{(i)*}(\omega_k) \quad (7)$$

$$\omega_k = \frac{2\pi k}{N}, \quad (0 \leq k \leq N)$$

식(7)로 표현한 $C_x(\omega_k)$ 를 이용하여 합성조정벡터를 구성하는 θ_c 를 구하게 되는데 $C_x(\omega_k)$ 를 양정치 행렬이라 가정하여 고유값을 구하고 식(8)처럼 순서를 정할 수 있다.

$$\lambda_i(\omega_k) \geq \lambda_{i+1}(\omega_k) \geq \dots \geq 0 \quad (8)$$

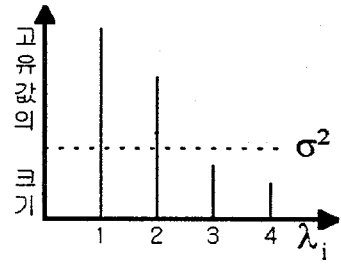


그림 2. 고유값을 이용한 신호원의 수 판별

그림2는 고유값의 크기를 나타내었는데 여기서 λ_{i+1} 이 λ_i 보다 급격히 작아지면 신호원의 수 q 는 $q = i$ 라 할 수 있다[5]

2.3 DOA의 갱신

DOA의 갱신은 식(11)에 의해서 진행되는데 θ_c 에 증분 벡터 δ 를 더해서 $\theta_c + \delta$ 로 갱신한다. 이때 시스템 모형오차는 식(9)처럼 수정된다.

$$\epsilon_m(\omega_k, \theta_c + \delta) = [I - S(\omega_k, \theta_c + \delta)S(\omega_k, \theta_c)^\dagger] \cdot C_y(\omega_k)e_m(\omega_k) \quad (9)$$

$[S(\omega_k, \theta_c + \delta)S(\omega_k, \theta_c)^\dagger]C_y(\omega_k)e_m(\omega_k)$ 는 $S(\omega_k, \theta_c + \delta)$ 의 공간상에 놓이는 $C_y(\omega_k)e_m(\omega_k)$ 의 근사화 표현이 된다. $S(\omega_k, \theta_c + \delta)^\dagger$ 대신에 $S(\omega_k, \theta_c)^\dagger$ 를 사용하는 이유는 복잡해지는 문제를 단순화하기 위한 것이다. 증분 벡터 δ 를 찾기 위해서 식(9)로 표현되는 모형오차의 제곱값인 식(10)을 최소화 하도록 결정하면 된다.

$$C(\theta_c + \delta) = \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \mu_{km} \epsilon_m(\omega_k, \theta_c + \delta)^* \cdot \epsilon_m(\omega_k, \theta_c + \delta) \quad (10)$$

$$\theta_c^{new} = \theta_c^{old} + \alpha \delta, \quad (0 < \alpha \leq 1) \quad (11)$$

식(10)을 최소화하는 δ 를 구하기 위해서 경사 알고리즘의 하나인 MGN(Modified Gauss Newton)[6]을 사용한다. 경사 알고리즘을 사용하기 위해서는 적당한 초기값의 설정이 필요하다. 그래서 MUSIC(Multiple Signal Classification) 알고리즘을 이용하여 DOA값의 근사 초기값을 구하여 경사 알고리즘의 초기값으로 사용한다. 식(11)에 대입하여 식(6c)가 최소화될 때 까지 위 과정을 반복하면 θ_c 의 값을 구할 수 있다. 이때 θ_c 는 신호원의 위치를 나타내는 DOA 벡터가 된다.

부분방전의 위치 추정 과정

단계1. 센서에서 검출된 신호의 고유공간 해석을 통해 구한 고유값의 크기 비교하여 부분 방전원의 수를 결정한다.

단계2. MUSIC 알고리즘을 이용하여 부분 방전원의 DOA 근사값을 구한다.

단계3. 2번과정에서 구한 근사값을 경사알고리즘의 초기값으로 사용하여 부분 방전원의 DOA 값을 추정한다.

표준편차이고 표2에서 평균값이 10dB인 경우 19.94이고 표준편차가 0.024임을 나타낸다.

SNR (dB)	20 °	45 °
10	19.946 ± 0.024	44.962 ± 0.011
20	19.935 ± 0.003	44.992 ± 0.001

표 2 . 두 개의 신호원인 경우 평균, 표준편차

3. 모 의 실험 및 결과

3.1 모 의 실험

부분 방전원은 일반적으로 중심 주파수가 200 kHz이고 대역폭이 50 kHz인 초음파 신호이므로 모의 실험시 부분 방전 신호에 가까운 것을 사용했으며, 신호원의 특성은 평면파라 가정했다. 부분방전 신호원이 한 개 일때와 두 개일때를 분류하여 모의실험 하였다. 신호원이 한 개일때는 방위각은 20°, 두 개일때는 20°, 45°에서 발생시켰을 때 신호원의 수와 위치를 찾아보았다. 센서에 유입되는 잡음은 가우시안 백색잡음이라 가정하고 모의실험을 하였다. 각 센서에서 측정된 신호를 샘플링 주파수 2500 kHz로 하였으며 실험때마다 1024개의 샘플 데이터를 이용하였다.

3.2 실험 결과

경우1. 신호원이 한 이고 방위각은 20°인 경우

이 경우는 변압기 내부에서 발생하는 부분방전신호원이 한 개때 신호원의 수와 위치를 찾기 위하여 모의 실험한 것이다. 표1은 참값을 추정했을 때 SNR에 대한 평균과 표준편차이고 표1에서 평균값이 10dB인 경우 20.12이고 표준편차가 0.022임을 나타낸다.

S N R (dB)	20 °
5	19.981 ± 0.026
10	20.124 ± 0.022
15	19.975 ± 0.021
20	19.987 ± 0.012

표 1 . 단일신호원인 경우 평균, 표준편차

경우2. 두 신호원의 방위각이 20°, 45°인 경우

이경우는 부분방전신호원이 두 개때 신호원의 수와 위치를 찾기 위하여 모의 실험한 것이다. 표2는 20°, 45°참값을 추정했을 때 SNR에 대한 평균과

4. 결 론

본 연구에서 사용한 알고리즘을 이용하여 부분 방전의 수와 위치를 표1과 표2와 같이 추정할 수 있었다. 두 경우를 비교해 보면 단일 신호원에 의한 부분 방전신호에대한 결과가 신원의 두 개일때 보다 좋지만 두 개의 신호원에서 동시에 신호가 발생 하더라도 부분 방전 신호의 위치추정을 표2와 같이 할수 있음을 보였다. 표2에서 평균값을 보면 20dB일 경우 19.94 44.99로서 오차가 0.01~0.06 정도인데 이 정도의 오차는 1미터에 대한 1°의 편차는 1.74센티미터 이므로 변압기의 부분방전의 위치추정에서 허용될 수 있다.

이상의 실험 결과 본 연구에서 사용한 알고리즘을 이용하면 부분 방전에 대한 정보를 이용한 예방진단 시스템에서 진단시스템의 신뢰성을 높일수있을 뿐만 아니라 수리시간 단축 및 경비의 절감을 할 수 있다. 본 연구의 방법은 부분방전 신호 원이 다수일 경우에도 적용이 가능하므로 부분방전에 의한 예방진단 기술의 실용성을 확보할 수 있다.

(참 고 문 헌)

- [1] 권동진, "초음파 경향분석에 의한 전력용 변압기의 예비 진단에 관한 연구" 숭실대학교 박사 학위논문, 1995.6
- [2] 광희로 외 5명, "Rowgoski Coil과 초음파 센서를 이용한 변압기내 부분방전 탐지 및 위치 검출" 대한 전기학회 하계학술대회 논문집, 1990.7
- [4] 전력기기 예방진단 기술연구, 한국전력 기술연구원, 1991. 3
- [5] JAMES A. CADZOW, " Multiple Source Location - The Signal Subspace Approach" 1990. IEEE Trans. Acoustics, speech, signal processing. Vol. ASSP-38, PP. 1110-1125, July. 1990.
- [6] D.G.Luenberger, Introduction to Linear and Nonlinear Programming. Reading, MA: Addison-Wesley. 1973.