

## Threshold-Initial peak detection을 이용한 가스 절연 변압기의 절연 결함 위치 판별

손익권, 오충석, 정승용, 이방욱, 구자운  
한양대학교

### Localization of insulation defect applying Threshold-Initial peak detection method

Ui-Kwon Son, Choong-Seok Oh, Seung-Yong Jung, Bang-Wook Lee, Ja-Yoon Koo  
Hanyang University

**Abstract** - 가스절연변압기(GITr)는 우수한 절연내력과 높은 신뢰성을 장점으로 가지고 있지만, 제작과 운전 단계에서 절연 결함이 발생할 수 있고 이러한 결함들은 가스절연변압기 사고의 원인이 될 수 있다. 따라서 결함에 대한 상시 진단 및 원인 분석이 반드시 선행되어야 하며 이와 같은 진단 분석 기법의 하나로 내부 절연결함의 위치 판별에 대한 연구의 필요성이 절실히 요구되고 있다. 따라서 본 논문에서는 일반적으로 부분 방전의 위치 판별을 위한 time delay 측정법 중 하나인 Cross-correlation 방법과 함께 제안한 Threshold-Initial peak detection 방법을 적용하여 위치 데이터를 취득하고 신뢰구간 이내의 데이터만 사용하여 부분 방전 위치 판별 한 결과, 더욱 정확한 위치 판별이 가능하였다

$$Energy\ Average(t) = \frac{1}{t - \tau_{initial} - \tau_{end}} \sum_{\tau} V(\tau)^2 \quad (3)$$

임펄스의 경우, 전압 상승 구간에서 최대값(crest value)의 30%와 90%가 되는 점을 직선으로 이어, 가로(시간)축을 지나는 점을 새로운 원점으로 고려하여 '규약 원점'으로 정의한다.[3]

이러한 임펄스의 규약 원점 정의 방법에 착안하여, energy average 기법이 적용된 신호 파형의 최대값을  $V^2_{peak}$ , 최대 10%값이 되는 값을  $V^2_{0.1peak}$ 로 정의하였다. 그림 1와 같이  $(t_{V^2_{peak}}, V^2_{peak})$ 와  $(t_{V^2_{0.1peak}}, V^2_{0.1peak})$ 을 이은 직선과 가로축과의 교점을  $t_0$ 라 정의(식 (4), (5), (6))하였다.

### 1. 서 론

대도시의 전기 에너지의 수요 증가에 따른 안정적인 전력 공급을 위해 도심에 옥내 지중변전소 건설이 증가하며 이에 따라 제한된 공간과 환경보호 방안이 고려된 SF6 가스절연변압기의 사용이 증가하고 있다.

기존의 유입식 변압기에 비해 가스절연변압기는 화재에 대한 탁월한 방재성을 지녀 화재나 폭발의 위험성이 상당히 작고, 경년열화가 절연유에 비해 매우 작아 높은 신뢰성을 지니고 있다. 또한 가스 절연 개폐기(GIS)와 직접 연결이 가능하여 공간 활용의 이점을 지닌다.

이러한 가스 절연 변압기의 사고 예방과 안전한 운용을 위해, 가스 절연 변압기의 내부 결함에서 발생하는 부분방전의 진단에 대한 연구가 이루어지고 있으며, 특히 GITr 내부 결함의 위치 판별과 관련된 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 위치 판별 연구는 구조체 내부에서 발생되는 부분방전의 시간차(Time Delay)와 삼변측정법(Trilateration)을 바탕으로 연구되어 왔다.[1] 일반적으로 시간차 측정에는 cross-correlation 방법이 적용되어[1,2] 왔는데 본 논문에서는 cross-correlation보다 더욱 더 정확한 Threshold-Initial peak detection 방법을 이용한 부분 방전 위치 판별 알고리즘을 제안한다.

### 2. 본 론

#### 2.1 관련이론

##### 2.1.1 Cross-correlation method

Time delay를 이용하여 부분 방전의 위치를 판별하는 방법 중 하나인 Cross-correlation은 두 개의 신호의 유사성을 측정하는 방법으로 두 신호 사이의 상대적인 시간의 함수로 표현된다. 시간에 대한 함수  $x(t)$ 와  $y(t)$ 의 cross-correlation function은 아래의 식 (1)과 같다.

$$Rxy(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t)y(t+\tau)dt \quad (1)$$

위 식 (1)에 대한 discrete form은 식 (2)와 같다

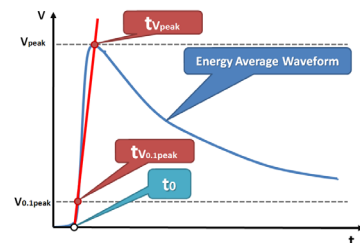
$$Rxy(mT_s) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N+1} \sum_{k=-N}^N x(kT_s)y(kT_s+mT_s)dt \quad (2)$$

2개의 discrete function  $x(kT_s)$ 와  $y(kT_s+mT_s)$ 의 시간차( $mT_s$ )는  $R_{xy}^{-1}(peak)$ 으로 정의된다.

##### 2.1.2 Threshold-initial peak detection(TIPD) method

이 방법은 부분 방전 신호가 포함되어 있는 노이즈를 제거하기 위해 어느 시점 이전을 노이즈로 설정하고 노이즈 레벨 밖의 데이터 값 중 첫 peak값의 시점을 부분 방전의 개시 시점으로 정의한다.

오실로스코프로 취득한 부분 방전 신호 데이터에 식(3)을 적용하면 일반적으로 아래의 그림 1과 같이 임펄스 파형과 유사한 파형을 얻을 수 있다.



<그림 1> Energy average 기법을 적용한 부분 방전 신호와 임펄스 규약 원점 정의 방법을 적용하여 계산된  $t_0$ .

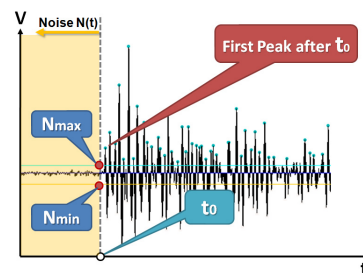
$$t_{V^2_{peak}} = Energy\ Average^{-1}(V^2_{peak}) \quad (4)$$

$$t_{V^2_{0.1peak}} = Energy\ Average^{-1}(V^2_{0.1peak}) \quad (5)$$

$$t_0 = \frac{0.9}{(t_{V^2_{peak}} - t_{V^2_{0.1peak}})} \cdot t_{V^2_{0.1peak}} - 0.1 \quad (6)$$

그림 2와 같이  $t_0$  이전의 데이터( $V(t), t \leq t_0$ )를 노이즈  $N(t)$ 로 정의한다. 이 노이즈 영역 내의 최소값( $N_{min}$ )과 최대값( $N_{max}$ )을 Threshold level로 정의하여 노이즈 영역을 제외한 원 신호  $V(t)$ 의 peak값들 중  $N_{min}$ 보다 작은 값,  $N_{max}$ 보다 큰 값들을 추출하여, 그 중 첫 번째 Peak 지점을 부분 방전 개시 시점으로 정의한다.

$$N_{min} = Min(N(t)) \quad N_{max} = Max(N(t)), \quad N(t)=V(t) \text{ for } t \leq t_0 \quad (7)$$



<그림 2>  $t_0$ 에 의해 정의된 노이즈  $N(t)$ 와  $N_{max}$ ,  $N_{min}$ 를 통해 계산된 원신호의 initial peak

##### 2.1.3 Credible(Confidence) Interval

통계처리에서 어느 모집단  $X$ 의 모평균  $\bar{X}$ 가 신뢰구간 내에 들어있다고 추정할 때 이러한 추정이 옳을 확률을 신뢰도라 한다. 일반적으로

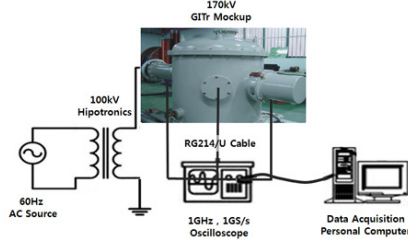
95%의 신뢰도를 사용하는데, 이에 해당하는 모집단 X의 신뢰구간[4]은 아래 식 (8)로써 정의된다.

$$\bar{X} - 1.96 \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq X \leq \bar{X} + 1.96 \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (8)$$

여기서  $\bar{X}$ 는 표본들의 평균,  $\sigma$ 는 표준편차,  $n$ 은 표본의 개수이다. 본 실험에서는 식(8)을 부분 방전 발생 위치 데이터에 적용하여, 계산된 부분 방전 발생 위치 중 신뢰 구간 내의 데이터만 발생 위치로 정의하였다.

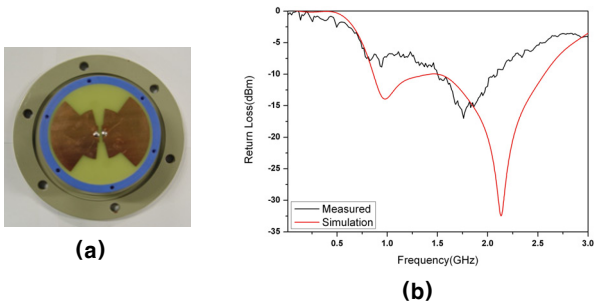
## 2.2 실험구성

본 연구는 그림 3와 같이 AC 내전압 실험기(Hipotronics, AC 100kV, 60Hz)를 사용하여 GITr 내부에 설치된 인위 결함에 전압을 인가하여 PD를 발생시켰다.



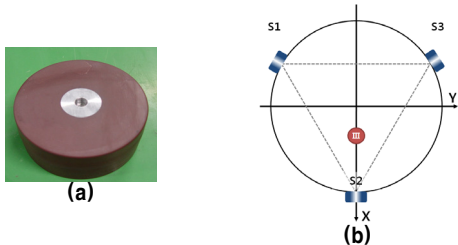
〈그림 3〉 실험 구성도

인위 결함은 전압 인가 측과 접지 측의 금속 전극에서 발생하는 반사파를 최소화하기 위하여 여러 결함 중 그림 5.a와 같은 void 결함을 이용하였다. 또한, 신호 전달 시간을 동일하게 하기 위하여 5.5m 길이의 RG-214 cable을 각 센서에 연결하였다, 각 센서에 의해 검출된 신호를 오실로스코프(LeCroy, 1GHz, Quad: 10GS/s)로 측정하였다. 오실로스코프로부터 취득한 데이터는 데이터 분석 프로그램인 Labview를 이용하여 센서의 위치 별 부분 방전 신호의 도착 시간을 분석하였다.



〈그림 4〉 광대역 Fat-dipole Antenna(a)와 Return Loss(b)

반지름 450mm의 170kV-22.5kV급 GITr Mock-up(scale down to 1/3)의 원통형 외함의 원주상에 반사 영향에 따른 PD 신호의 왜곡을 최소화 하기 위해, 그림 4.b와 같은 광대역 특성 (700MHz~2.5GHz: -5dBm 기준)을 가지는 동일한 패턴 3개의 내장형 UHF센서(Fat Dipole 안테나)(그림 4.a)[5] S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub>를 원주에서 120°간격(정삼각형 형태)으로 설치하였으며 Void 결함을 지면 수평한 평면상에 센서와 동일한 높이에서의 센서 S<sub>2</sub>에 근접한 위치(D1)에 배치하였다.(그림 5.b)



〈그림 5〉 (a) Void 결함 (diameter: 102mm, thickness: 46mm)  
(b) 센서 S<sub>1</sub>(-225, -389.71), S<sub>2</sub>(450, 0), S<sub>3</sub>(-225, 389.71)의 위치와 결함 D1(69, 0) 위치

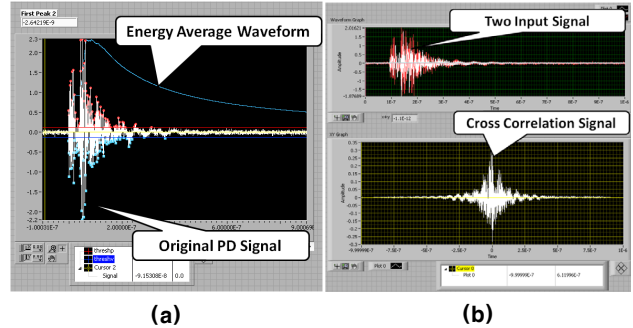
본 실험에서는 특정 결함의 위치로부터 각 센서에 도달한 3개의 신호 중, 부분 방전 신호가 최초로 도착한 센서를 기준으로 하여 해당 센서의 반지름을 변수로 설정하고 그 반지름을 증가시키면서 형성되는 원과 나머지 두 센서를 중심으로 하는 두 개의 원과의 교차점을 판별하였다.

절연율과 도파관 특성에 영향을 받지 않는 빛의 속도 2.99792458 [m/s]를 부분방전 신호의 전파속도로 하여 각 센서와 인위 결함 간의

거리를 구하였다.

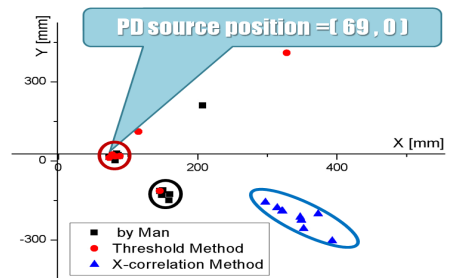
## 2.3 실험 결과

오실로스코프를 통해 취득한 부분방전 신호의 파형을 2.1.1절과 2.1.2 절의 TIPD method와 cross-correlation method(그림 6)에 적용하여 부분 방전 신호의 시간차를 구하였다. 또한 육안으로 직접 예상되는 부분 방전의 시작점을 찾는 방법도 적용하여, 총 세 가지의 방법을 통해 부분 방전 신호의 시간차를 계산하였다.



〈그림 6〉 Labview로 구현한 threshold-Initial peak detection method(a)와 cross correlation method(b)

계산된 부분 방전 신호의 시간차 값들 중에 평균에서 많이 벗어난 시간차 값들은 평균값에 큰 영향을 준다. 이에 따라 2.1.3에서 언급한 95% 신뢰구간을 적용하게 되면 신뢰구간 외의 시간차 값들은 에러로 분류하게 된다. 신뢰구간 내의 시간차 데이터 값만을 이용한 부분 방전 발생 위치 계산 결과는 그림 7과 같다.



〈그림 7〉 신뢰구간 내의 부분 방전 위치

## 3. 결 론

본 논문에서는 부분 방전 신호에 대한 위치를 판별하기 위해, cross-correlation method와 TIPD method를 적용한 결과 다음과 같은 사실을 알 수 있었다.

첫째, cross-correlation method를 통해 계산된 부분 방전 발생 위치는 실제 결함 위치에서 20cm 이상 벗어났다.

둘째, threshold-initial peak detection method를 적용한 결과, 계산된 부분 방전 위치가 넓게 분포되어 있지만 대부분이 실제 결함 위치에서 10cm 이내에 위치하였다. 여러 분포로 부분 방전 예상 위치점들이 모여 있는데, 그중에 하나의 분포는 PD 발생지점에 형성되어 있다. 또한 그 형태가 육안으로 판별한 위치와 유사한 분포형태를 보인다.

향후, energy average waveform형태에 따른 TIPD Method를 최적화 시켜 정확한 노이즈영역 t<sub>0</sub>값의 정의가 가능하도록 추가 연구를 진행코자 한다.

## [참 고 문 헌]

- [1] Y. Sun, B.G. Stewart, I.J. Kemp, "Alternative cross-correlation techniques for location estimation of PD from RF signals", UPEC 2004 39th International, Vol. 1, pp143-148, 2004
- [2] Xin Li, Chengrong Li, Lijian Ding, Jing Yang, Hailiang Li, "Improvement of PD location in GIS [gas-insulated switchgear]", Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2004. CEIDP '04. 2004 Annual Report Conference on, pp418-421, 2004
- [3] 김정태, "고전압 이론과 응용", 교유사, pp19-21, 2001
- [4] Zar.J.H., "Biostatistical Analysis", Prentice Hall International, pp43-45, 1984
- [5] 김영홍, 박재홍, 정승용, 류철취, 구자윤, "GITr 내부 발생 부분방전 신호 검출을 위한 UHF 센서 개발", 2007년도 대한전기학회 송배전 설비연구회 및 고전압 및 방전응용 기술연구회 합동 춘계학술대회, pp 2-71~2-74, 2007