

삼변측정법을 이용한 2차원 부분방전 발생원의 위치 판별

손의권, 오충석, 정승용, 이방욱, 구자윤
한양대학교 SMDT lab.

Two Dimensional Localization of Partial Discharge using Trilateration Method

Ui-Kwon Son, Choong-Seok Oh, Seung-Yong Jung, Bang-Wook Lee, Ja-Yoon Koo
SMDT Lab. Hanyang University, Ansan-si, Gyunggi-do, 425-791, South Korea

Abstract - 가스절연변압기(GITr)는 우수한 절연내력과 높은 신뢰성을 장점으로 가지고 있기 때문에 운전 시 유지 보수가 불필요하도록 설계목표를 정하여 제작되고 있지만, 제작과 운전 단계에서 치명적인 결함이 발생할 수 있고, 이러한 결함들은 전력기기 사고의 원인이 될 수 있다. 따라서 사고 발생 전 단계에서 대규모 전력 사고의 발생 요인 중 하나인 전력기기 내부 결함에 대한 상시 진단 및 원인 분석이 반드시 선행되어야 하며, 이와 같은 진단 분석 기법의 하나로 전력 기기의 내부 결함의 위치 판별에 대한 연구의 필요성이 절실히 요구되고 있다. 따라서 본 논문에서는 일반적으로 Cubicle 구조체 위치의 판별에 사용되는 기법 중 하나인 삼변측정법(Trilateration)을 적용함으로써, GITr Mockup(170kV 급)의 세 개의 센서를 이용하여 결함에서 발생하는 부분방전 신호를 3차원적으로 분석하기 위한 연구를 위해 3개의 센서가 구성하는 평면 상에 인위적 결함을 위치시켜 결함의 위치를 2차원적으로 분석하는 연구를 수행하여 약 5cm 오차 범위 내에서 결함을 판별하였다.

〈그림 1〉 실험 구성도

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 2(b)와 같은 광대역 특성 (700MHz~2.5GHz: -5dBm 기준)을 가진 동일한 패턴 3개의 내장형 UHF센서(Fat Dipole 안테나)[4] S₁, S₂, S₃를 원점에서 120°간격(정삼각형 형태)으로 설치하였다. 또한 2차원적인 삼변측정법을 적용시키기 위해 PD 발생원인 Void 결함을 지면 수평한 평면상에 센서와 동일한 높이에서의 원 중심부근(I)과 각 센서와 근접한 위치(II):S₁에 근접, (III):S₂에 근접, (IV):S₃에 근접)에 배치하였다. 센서와 결함의 위치는 그림 2(c)와 같으며, 각 센서와 결함 위치에 대한 좌표는 표 1에 나타나 있다.

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.[1]

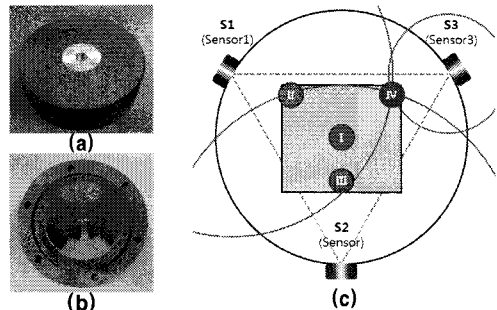
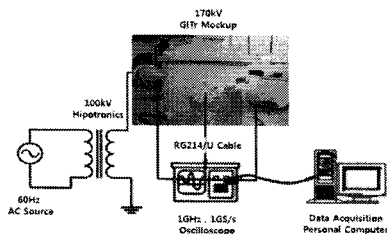
기존의 유입식 변압기에 비해 가스절연변압기는 화재에 대한 탁월한 방재성을 지녀 화재나 폭발의 위험성이 상당히 작고, 경년열화가 절연유에 비해 매우 작아 높은 신뢰성을 지니고 있다. 또한 가스 절연 개폐기(GIS)와 직접 연결이 가능하여 공간 활용의 이점을 지닌다.

이러한 가스 절연 변압기의 사고 예방과 안전한 운전을 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 대부분 센서에서 취득한 에너지 값의 변화가 큰 시점을 부분방전 발생 시점으로 정의하여 시간차를 구하는 Cumulative energy curve method[2]나 부분방전원의 에너지가 측정거리의 제곱에 반비례하는 특성을 이용한 Energy Attenuation method[3]와 같이 단순한 구조체 내부에서 발생하는 부분방전의 시간차(Time Delay)와 삼변측정법(Trilateration)을 바탕으로 연구되어 왔다. 따라서 본 논문에서는 GITr mock-up(170kV급)에 세 개의 UHF센서를 인위적 결함과 동일 평면상에 설치하여 방전 신호가 각 센서까지 도달하는 시간을 분석하고, 이를 2차원 삼변측정법에 적용함으로써 부분방전 발생 위치를 판별하고자 한다.

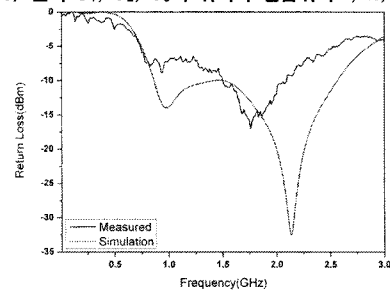
2. 본 론

2.1 실험구성

GITr 내부의 결함 위치 판별을 위한 실험구성은 그림 1과 같다. AC 내전압 실험기(Hipotronics, AC 100kV, 60Hz)를 사용하여 GITr 내부에 설치된 인위 결함에 전압을 인가하여 PD를 발생시켰다. 인위 결함은 전압 인가 축과 접지 축의 금속 평행판에서 발생하는 반사파를 최소화하기 위하여 여러 결함 중 그림 2(a)와 같은 void 결함을 이용하였다. 또한, 신호 전달 시간을 동일하게 하기 위하여 5.5m 길이의 RG-214 cable을 각 센서에 연결하였으며, 각 센서에 의해 검출된 신호를 오실로스코프(LeCroy, 1GHz, Quad: 10GS/s)로 측정하였다. 오실로스코프로 취득한 데이터는 데이터 분석 프로그램인 Labview를 이용하여 센서의 위치 별 부분 방전 신호의 도착 시간을 분석하였다.



〈그림 2〉 (a) Void 결함 (diameter: 102mm, thickness: 46mm)
(b) 광대역 Fat-dipole Antenna
(c) 센서 S₁, S₂, S₃의 위치와 결함위치 I, II, III, IV



〈그림 3〉 광대역 Fat-dipole Antenna의 Return Loss

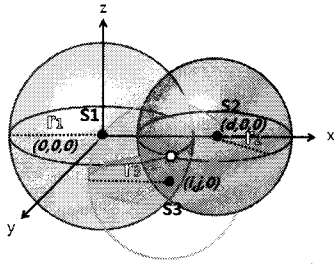
〈표 1〉 센서 및 결함 위치별 좌표

센서	좌표 [mm]	결함 위치	좌표 [mm]
S1	(-225, -389.71)	I	(0,0)
S2	(450, 0)	II	(-127.37, -124.21)
S3	(-225, 389.71)	III	(69, 0)
		IV	(-127.37, 124.21)

* 원점 : Mockup 의 중심

일반적으로 삼변측정법에서는 그림 4과 같이 임의의 세 개의 변 r₁, r₂, r₃ 중 한 변의 값이 주어졌을 때, 각 변의 길이의 차를 이용하여 위치를 판별한다. 따라서 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. 부분방전 신호의 공기 중의 전파속도는 절연유과 도파관 특성에 영향을

반지름이 빛의 속도 2.99792458 [m/s]를 이용하여 각 센서와 인위 결합 간의 거리를 구할 수 있다.



〈그림 4〉 시간차 거리 측정 및 삼변측정법

2.2 위치 알고리즘

Void 결합으로부터 발생한 PD 신호를 UHF 센서로 검출·분석하여 예상되는 PD 발생점을 찾기 위해 다음과 같은 두 가지 알고리즘이 사용되었다.

2.2.1 시간차 거리측정

각각의 UHF 센서에 같은 길이의 케이블을 연결하였기 때문에 케이블 내의 부분방전 신호의 전달 시간은 같으므로 발생한 PD 신호가 전파되어 각 센서에 도달하는 시간차만을 고려하면 그림 3에서 3개의 점(센서 S₁, S₂, S₃)에서 측정된 신호 중 S₁과 S₂에서의 신호 전달 시간차는 Δt₁₂이며, 이 값에 전파속도 V를 곱하면 식 (1)과 같이 부분방전이 발생된 지점으로부터 S₁까지의 거리(r₁)와 S₂까지의 거리(r₂)의 거리차 (r₁-r₂)를 구할 수 있으며 같은 방법으로 거리차 (r₁-r₃)을 식 (2)과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta t_{12} \cdot V = r_1 - r_2 \quad (1)$$

$$\Delta t_{13} \cdot V = r_1 - r_3 \quad (2)$$

2.2.2 삼변측정법

삼변측정법[5,6]은 삼각기하학을 이용하여 상대적인 임의의 좌표를 구하는 방법으로써, 2.2.1의 시간차 거리측정법을 통해 얻은 상대적인 거리차()를 이용하면 공간상 세 개의 좌표(3개의 센서 위치 좌표)에서의 임의의 좌표(예상 PD 발생지점)까지 거리 r₁, r₂, r₃를 반지름으로 하는 구들의 교점을 구할 수 있다.

그림 4와 같이 원점을 중심으로 하는 반지름 r₁의 구 하나와 (d,0,0), (i,j,0)을 중심으로 하는 반지름 r₂, r₃의 구를 가정하면, 각 구에 대한 식은 다음과 같다.

$$r_1^2 = x^2 + y^2 + z^2 \quad (3)$$

$$r_2^2 = (x-d)^2 + y^2 + z^2 \quad (4)$$

$$r_3^2 = (x-i)^2 + (y-j)^2 + z^2 \quad (5)$$

이를 이용하여, 구할 수 있는 3개의 구가 만나는 교점의 좌표(x,y,z)는 다음과 같다.

$$x = \frac{r_1^2 - r_2^2 + d^2}{2d} \quad (6)$$

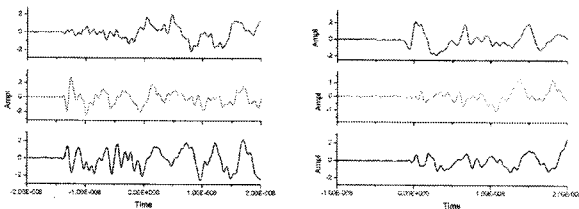
$$y = \frac{r_1^2 - r_3^2 - x^2 + (x-i)^2 + j^2}{2j} \quad (7)$$

$$z = \sqrt{r_1^2 - x^2 - y^2} \quad (8)$$

본 논문에서는 위의 식을 바탕으로 좌표값 x, y, z 중 변수를 최소화하기 위하여 변수 z를 생략하였다. 따라서 좌표값 x, y만을 지닌 2차원 삼변측정법을 사용하여 결합의 위치 판별에 적용하였다.

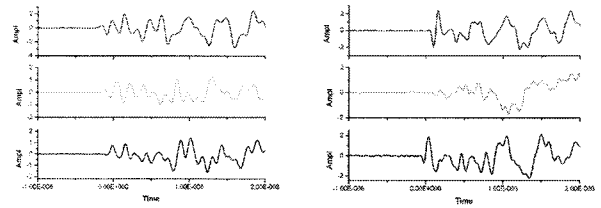
2.3 실험결과

각각의 결합 위치(I, II, III, IV)에서 측정된 PD 신호간의 시간차를 이용하여 각 센서와 인위 결합 간의 거리를 계산하고 이를 기존 삼변측정법에 적용하여 실제 PD 발생 위치를 판별하였다. 그림 5의 (a), (b), (c), (d)는 오실로스코프로 측정된 각 결합 위치별 PD 신호 그래프이다.



(a) (I):외함의 중앙

(b) (II):Sensor 1 근처



(c) (III):Sensor 2 근처

(d) (IV):Sensor 3 근처

〈그림 5〉 결합위치별 오실로스코프 측정파형

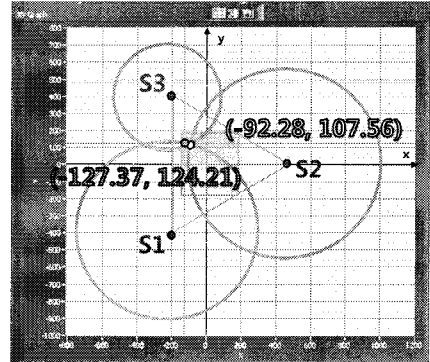
결합위치 별로 측정된 입력파형을 통하여 측정된 시간차, 거리차 및 계산된 예상 PD 발생 지점은 표 2와 같다.

〈표 2〉 결합 위치별 측정된 시간차, 거리차 및 계산된 예상 PD 발생 지점

	Signal	Δt ₁₂	Δt ₁₃	ΔR ₁₂	ΔR ₁₃	Location
I	S ₃ -S ₂ -S ₁	0.101	0.114	30.3	34.2	(-9.06,-20.48)
II	S ₁ -S ₃ -S ₂	0.667	0.769	200.0	230.6	(-90.08,-112.51)
III	S ₂ -S ₁ -S ₃	0.439	0.531	131.6	159.1	(97.65,-18.6)
IV	S ₃ -S ₁ -S ₂	0.639	0.762	191.6	228.5	(-92.28,107.56)

*Δt 단위 : [ns] *ΔR 및 Location 단위 : [mm]

표 1의 결합 위치와 표 2의 계산된 PD 발생 위치를 비교하였을 때, 최대 4.3cm 범위(결합 위치 II의 경우)이내로 위치 판별이 가능하였다. PD 발생 위치 판별의 예로서 그림 6에 인위 결합이 (IV) 위치에 있을 때 본 연구에서 적용한 알고리즘에 의해 계산된 PD의 발생 지점(흰색)과 실제 결합의 위치(노란색)를 나타내었다.



〈그림 6〉 결합이 IV에 위치했을 때의 예상 PD 발생 지점과 실 결합 위치

3. 결 론

본 논문에서는 인위 void 모의 결합을 이용하여 GITr 외함의 원주 상에 설치된 3개의 센서가 이루는 평면상의 결합 위치를 삼변측정법을 통해 계산하였다. 위치별 부분 방전 발생 위치는 실제 결합 위치에서 최대 4.3cm 범위 이내로 판별이 가능하였다. 향후 각각의 센서 위치가 구성하는 평면상이 아닌 곳에 결합을 위치시켜 2차원 삼변측정법을 3차원으로 확장하여 연구를 수행할 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] 정승용, 구자윤, "GITr(Gas Insulated Transformer)내부에 발생되는 PD 신호의 패턴분석을 위한 PRPD와 CAPD 적용결과 비교", Trans. KIEE, Vol. 55C, pp308~312, 2006
- [2] L. Yang, M.D. Judd, C.J. Bennoch, "time delay estimation for UHF Signal in PD location of transformers", Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2004. CEIDP '04. 2004 Annual Report Conference, pp. 4 14-417, 2004
- [3] Sander Meijer, Rogier A. Jongen, Edward Gulski, JohanJ. Smit, "Localization of Insulation Defects in Power Transformer Based on Energy Attenuation Analysis", International Symposium on Electrical Insulating Materials, pp698-701, 2005
- [4] 김영홍, 박계홍, 정승용, 류철휘, 구자윤, "GITr 내부 발생 부분방전신호 검출을 위한 UHF 센서 개발", 2007년도 대한전기학회 송배전 설비연구회 및 고전압 및 방전응용 기술연구회 합동 춘계학술대회, pp 2-71~2-74, 2007
- [5] Shen, Z.B. El-Saadany, E.F, "Localization of partial discharges using UHF sensors in power transformers", Power Engineering Society General Meeting, IEEE, pp. 6, 2006
- [6] Y. Sun, B.G. Stewart, I.J. Kemp, "Alternative Cross-Correlation Techniques for Location Estimation of PD from RF Signal", Universities Power Engineering Conference, 2004. UPEC 2004. 39th International, Vol 1, 1, Page(s):143 - 148, 2004