

GIS내 부분방전 검출을 위한 광대역 UHF 센서 개발

김영노, 최재옥, 이영상, 김재철*, 박기준**, 구선근**, 윤진열**
 (주)피에스디테크, *송실대학교 **전력연구원

The development of Ultra-High Frequency(UHF) sensor for
 Partial Discharge monitoring in Gas Insulated Switchgears

Young-Fo Kim, Jae-Ok Choi, Young-Sang Lee, * Kim jae chul, ** Kijun Park** Sun-Gaun Goo** Jin-Yul Yoon**
 R&D Center PSDTech., Inc., * Soongsil University **Korea Electric Power Research Institute

Abstract - We developed internal and external type sensor to measure ultra-high frequency (UHF) partial discharge (PD) in 170 kV gas-insulated switchgears (GIS). We also manufactured a PD-generator to verify and measure the detection sensitivity of those sensors. We measured the output power of the UHF PD sensors induced by PDs of 5 pC using the PD-generator. We measured UHF propagation loss of an 170 kV GIS for optimal arrangement of the sensors. We used swept UHF signal from a network analyzer into the GIS to measure the loss of various components of the GIS.

2. 본 론

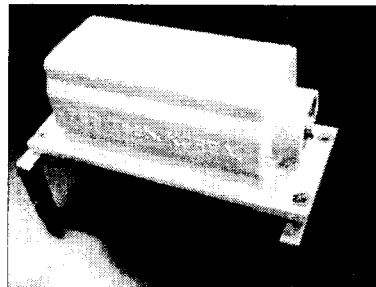
2.1 UHF 부분방전 센서 개발

GIS내부결함에 의하여 발생하는 부분방전 전류의 펄스 폭은 수백 ps 정도로 대단히 짧으며, 주파수 대역이 넓고, 다양한 주파수 성분이 포함되어 있는 것으로 알려져 있다. 이러한 신호는 전달경로에 따라서 여러 가지의 공진모드를 갖는 전자기파로서 GIS내부에 전파된다. 이러한 UHF 부분방전 검출법을 적용하기 위해서 선행되어야 할 것은 미소부분방전을 측정할 수 있는 고감도의 센서 제작이다. 본 논문에서는 GIS내부 미소 부분방전시 발생하는 전자파를 검출 할 수 있는 안테나형 센서를 개발하였다. 센서를 제작하기 위한 중요 설계요소로서 외부 잡음으로부터의 패치 안테나의 고립화, 임피던스의 정합, 설치 및 적용방법의 용이성을 고려하여 제작하였다.

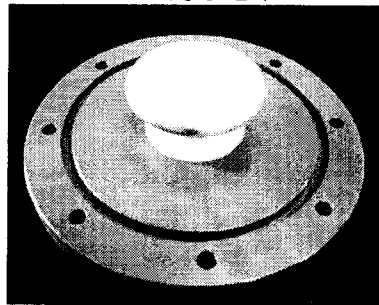
1. 서 론

최근 전력설비 용지확보 및 경제성 등의 문제점으로 밀집형 전력설비가 늘어나는 추세이다. 그 중 가스절연개폐장치 (Gas-insulated switchgear, GIS)는 밀집형 전력설비의 대표적인 것으로 절연내력이 우수한 SF₆ 가스를 금속 외함에 충전시켜 밀폐시킨 전력기기로서 각종 환경적인 영향에 둔감한 안정적인 특성을 가진다. 이러한 이유로 최근 국내의 변전 설비는 GIS 방식으로 중설 및 교체되고 있다. GIS는 기존의 공기절연방식에 비해 모든 장치들이 금속용기에 포함되어 있는 구조로 인해 운전비용이 적게 들고, 신뢰도가 높으며, 설치공간이 작으므로 공간이 부족한 도심지역 등에도 건설이 가능하다는 장점이 있다. 그러나 설치비용이 고가이고 내부고장이 발생할 때는 설비용량의 대형화로 전력계통에 미치는 여파가 크다. 또한 복구에 드는 비용이 고가이고 복구하는데 긴 시간을 필요로 한다. 이러한 문제를 보완하기 위하여 최근에는 내부이상으로 인한 절연파괴 및 고장을 사전에 외부에서 인지가 가능한 예방진단기술이 활발하게 적용되고 있다. 특히 IEC와 CIGRE에서는 GIS 진단방법으로 극초단파 (Ultra-high frequency, UHF) 부분방전 (Partial discharge, PD) 검출법을 권장하고 있으며 이 기술을 바탕으로한 On-Line 또는 On-Site 진단 시스템이 적용되어야 한다고 제시하고 있다.[1]

본 논문에서는 GIS의 PD 검출 장치에 적용될 수 있는 내장 및 외장형 광대역 UHF PD 센서를 개발 하였다. 개발된 센서를 이용하여 IEC-60270법에 의한 걸보기 부분방전량 (5 pC)을 측정하고 부분방전 신호에 대한 센서의 측정주파수와 출력 에너지를 확인 할 수 있었다. 개발된 센서의 현장적용 및 GIS내의 최적 배치를 위하여 운전 중인 변전소에서 외장형 센서를 이용하여 GIS 내부의 신호 전파 손실을 측정하였으며 해당 GIS에 UHF PD센서를 적용할 때 적절한 배치 방안에 대하여 제시하였다.



(a) 외장형 센서



(b) 내장형 센서

그림 1. 개발된 UHF 센서.

그림 1(a) 의 외장형 센서는 GIS의 에폭시 스페이서 (Barrier)에 적용하여 내부에서 발생된 부분방전신호를 측정하기 위한 센서이며, 그림 1(b)의 내장형센서는 GIS 외함에 장착하여 내부의 부분방전 신호를 측정하기 위한 센서이다. 외장형 센서는 스페이서에 의한 신호의 감쇄와 외부 노이즈에 대한 영향을 많이 받으나 기존에 설치된 GIS에 기기 변형 없이 설치 및 측정을 할 수 있는

센서이다. 내장형센서의 경우 GIS에 센서를 설치하기 위한 센서설치용 창이 필요하나 외부의 잡음과 주변 환경에 대한 손실이 적어 외장형센서 보다 넓은 구간을 측정할 수 있다. GIS내에 발생하는 부분방전 신호의 경우 넓은 주파수 대역을 가지고 있으나, 400 ~ 500 MHz 이하의 대역 에서는 GIS에 유입되는 기중방전 또는, 방송파와 같은 외부잡음이 많아 측정주파수 대역에서 제외하는 것이 적절하다. 아울러 1.5 ~ 2 GHz 이상의 대역은 전송선 손실과 GIS 내의 구조물 또는 스페이서 등에서 UHF 신호의 감쇄가 심하다.[2~4] 이러한 점들을 고려하여 비교적 UHF 신호 검출이 용이하고 GIS내부에서 비교적 전파가 잘 되는 500 ~ 1500 MHz 를 센서의 측정주파수로 선정하여 제작하였다.

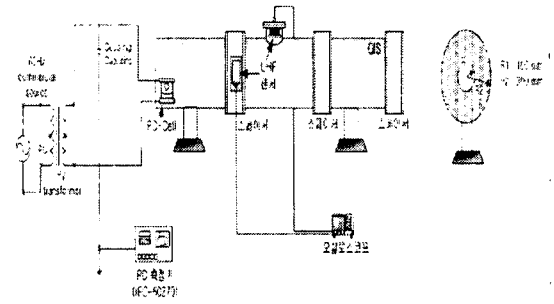


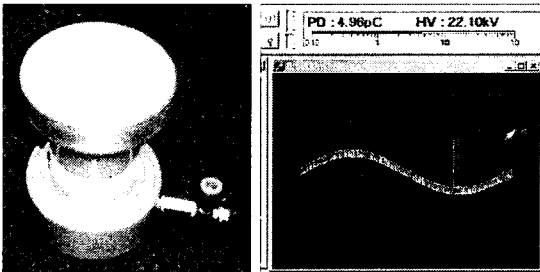
그림 3. 센서 감도 실험 구성.

2.2 모의 GIS 챔버를 이용한 부분방전 측정

개발된 센서의 신호 및 감도측정을 위하여 모의 챔버를 제작하였다. GIS 특성을 고려하고 실제 GIS와 유사한 환경에서 부분방전을 측정 시험을 위해 국내에서 널리 사용되는 170 kV 단상 GIS를 기준으로 모의 GIS 챔버를 제작하였다. 또한 CIGRE에서 제시하는 방전량(5 pC)을 발생시키기 위하여 PD 발생장치를 제작하였다. PD 발생장치는 일정한 크기의 방전량(5 pC)이 지속적을 발생하여야 하며 GIS에 발생할 수 있는 방전의 형태를 모의 하여야 한다.

2.3 부분방전 신호의 측정

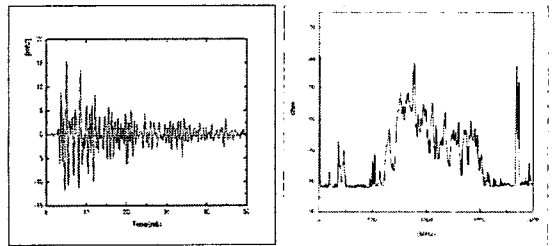
부분방전에 의해 발생된 전자파의 경우 센서의 특성에 따라서 측정되는 부분방전 신호의 주파수 특성 및 단일 펄스의 에너지에서 차이를 나타내게 된다. 그림 4 는 센서에 오실로스코프 (TDS7404, Bandwidth = 4 GHz, 20Gs/s, Tektronix)와 스펙트럼 아날라이저(FSP7, 9kHz - 7GHz, Rohde & Schwarz)를 이용하여 측정된 신호의 파형과 주파수 분포이다.



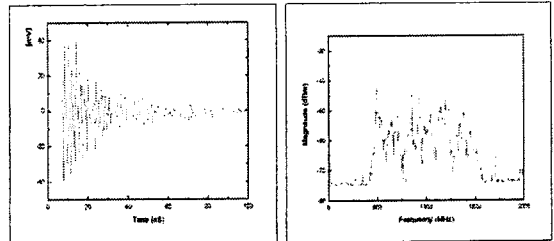
(a) 부분방전 발생장치. (b) 방전량 (5pC, 22 kV).
그림 2. 부분방전 발생장치와 측정된 부분 방전량.

그림 2의 PD-Cell은 상부 전극과 하부전극에 금속이물을 넣었으며 절연물로 GIS와 같이 0.5 MPa의 SF₆ 가스를 채웠다. 이를 이용하여 IEC-60270법에 의한 측정방법으로 걸보기 부분방전량 5 pC를 측정할 수 있었다. 제작된 센서를 가지고 PD-cell에서 발생한 부분방전을 측정하여 센서출력의 침투전력(Peak Power)과 측정된 신호의 에너지를 확인할 수 있었다.

이와 같이 제작된 챔버와 부분방전 발생장치를 이용하여, 개발된 센서의 감도를 측정하기 위한 시험설비를 그림 3과 같이 구성하였다. [5, 6] 내장형 센서는 GIS 챔버의 전용창에 설치를 하고 외장형센서는 스페이서에 설치하였으며, GIS 챔버의 한 쪽 부분에 PD-Cell을 설치 후 각 센서의 출력부에 오실로스코프와 스펙트럼 아날라이저를 연결하여 센서의 신호 및 측정 주파수를 확인할 수 있었다. 부분방전량은 IEC-60270 측정기(DDX8003, Robinson)를 이용하여 측정하였으며, 5 pC 발생시의 인가전압은 약 22 kV 이다.



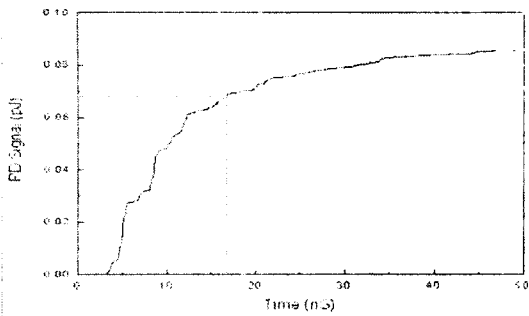
(a) 외장형 센서 측정 신호



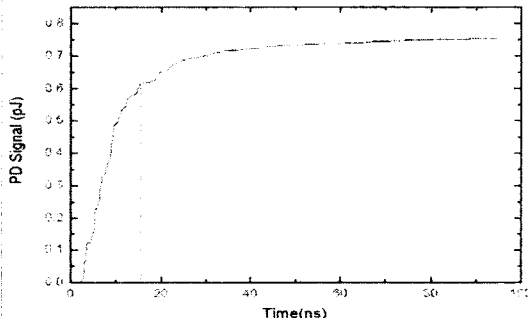
(b) 내장형 센서 측정 신호
그림 4. 5 pC 부분방전시 측정된 신호

그림 4 에서 보여지는 것처럼 신호는 내장형 센서의 신호의 크기가 외장형 센서의 신호의 크기보다 크다. 이는 외장형 센서의 설치 장소인 스페이서(Barrier)에 의한 손실과 센서의 절대 크기의 차이때문이라 생각된다. 부분방전 신호는 넓은 대역에 걸쳐 발생되나 센서의 주파수 특성에 따라서 내장형 센서는 450 ~ 1500 MHz의 주파수 대역에서 측정 되었으며, 외장형 센서의 경우 500 ~ 1600 MHz의 주파수 대역에서 측정되었다. 그림 5 는 측정된 신호의 단일 펄스에 대한 누적 에너지를 나타낸 것이며 이때의 출력 및 포화에너지는 표 1 과 같다.

표 1 에서와 같이 두 종류 센서의 출력을 표현할 수 있었으며, 출력에 있어 외장형 센서가 내장형 센서보다 약 7배정도로 작음을 알 수 있었다. 이는 외장형 센서가 장착된 스페이서(Barrier)에 의한 손실과 외장형센서의 낮은 이득 때문이라 생각된다.



(a) 외장형 센서



(b) 내장형 센서

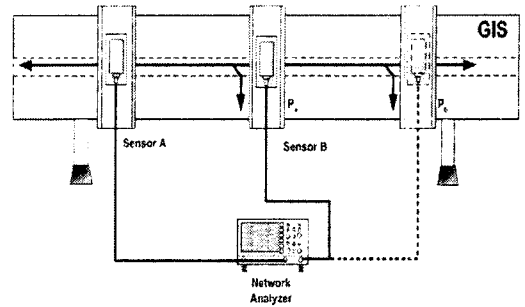
그림 5. 센서 출력의 누적에너지

표 1. 센서의 에너지 비교

종 류	포화에너지×0.8 (pJ)	포화시간 (nS)	센서 출력 dBm (μW)
내장형 센서	0.602	17	-18 (34)
외장형 센서	0.069	17	-24 (5)

2.4 센서의 최적배치

CIGRE는 UHF센서를 GIS에 설치할 때 IEC60270법에 의한 5 pC의 걸보기 방전량 이하를 검출 할 수 있도록 권장하고 있다. 따라서 CIGRE 권고안을 만족하기 위해서는 GIS내부 어느 곳에서 5 pC의 부분방전이 발생되어도 이 방전을 검출할 수 있도록 센서를 배치하여야 한다. 센서를 현장 GIS에 적용시 GIS내부의 신호 전파 경로에 의한 손실을 고려하여, 최적의 장소에 센서를 설치하여야 한다. 센서와 센서사이의 간격이 클수록 센서의 설치비용을 줄일 수 있다. 본 논문에서는 GIS내부의 전파손실을 운전 중인 170 kV GIS에서 측정하였다. 그림 6은 GIS 구조에 따른 신호의 손실을 측정하기 위한 방법이다.[7] 그림과 같이 2개의 같은 특성을 가지는 외장형 센서를 GIS의 스페이서(Barric)에 장착하여 GIS내의 전파손실을 측정하였다. GIS내 주파수가 변환되며 신호를 입력하기 위한 센서A와 가까운 곳에서 측정된 신호의 크기를 Pa, 떨어진 센서B에서 측정된 신호의 크기를 Pb라 하면 Pa - Pb가 전파손실에 해당한다.



[그림 6] GIS내부 신호 손실 측정방법

본 논문에서는 변전소에 설치되어 운전중인 3상 일괄형 170 kV GIS를 가지고 손실측정을 하였다. 170 kV GIS를 임의의 몇 개의 구간으로 나누어 측정을 하였다. 그림 7은 전체 GIS 구간을 구분하여 표시한 각 측정 구간의 형태이다. 각 구간별 신호 감쇄정도를 측정 하였다. 그림 8은 전체 구간중 차단기(CB)를 포함한 구간의 측정파형이다. CB를 포함한 측정소의 Pa와 Pb를 동시에 표현 하였다. 측정에 사용된 센서의 주파수의 특성을 고려하여 500 ~ 1500 MHz의 주파수의 대역에 대하여 적용 하였다. 이와 같은 방식을 적용하여 각 구간별 측정 데이터를 이용하여 감쇄율을 계산할 수 있다. 표 2는 각 구간별 감쇄율을 계산하여 구한 것이다.

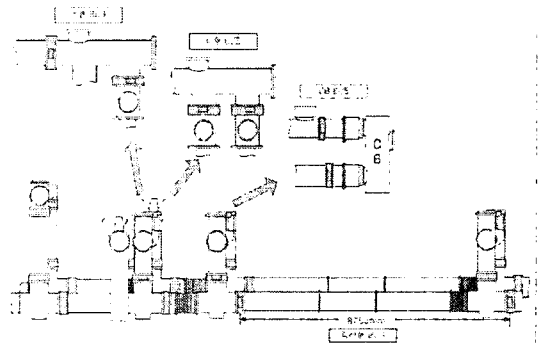


그림 7. GIS의 구간별 구분

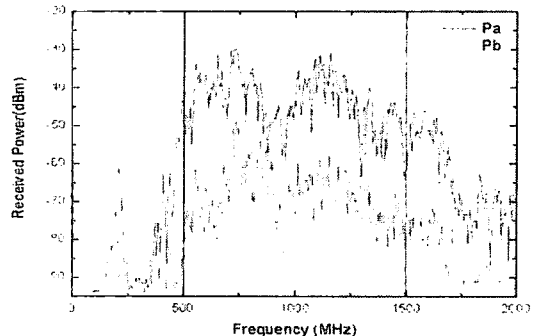


그림 8. 신호 손실 측정 결과 (CB를 포함한 BUS)

표 2. GIS구간별 손실 (500 ~ 1500 MHz)

	BUS	ㄱ형	CB	ㄴ형
손실 (dB)	0.94/m	10	24	10

표 2 는 부분방전시 센서가 측정할 수 있는 500 ~ 1500 MHz의 주파수 구간에 대해 손실을 계산하여 (Pa - Pb) 평균치를 적용하였다. 그 중 CB를 거치는 경우 가장 손실이 컸다. 표 2와 같이 170 kV GIS의 구간별 손실을 알 수 있었으며, GIS의 형태에 따라서 감쇄율의 정도가 달라짐을 알 수 있다.

구간별 감쇄율을 이용하여 5 pC PD발생시 센서에서 측정되어지는 측정값을 각 구간별 감쇄율을 적용하여 계산하게 되면 센서의 최적의 배치위치를 구할 수 있게 된다. 즉 5 pC 방전량 발생시 센서의 출력을 P라하고, 각 구간의 감쇄율을 L 이라 하면, 식 1 과 같이 센서의 출력 S를 구할 수 있다.

$$P - L > S + \alpha \quad (1)$$

식 1 에 S는 신호 측정 장치의 최소 검출가능 전력(감도)이며, 신호선과 연결부위의 손실은 α 이다. 위의 식에 의하여 신호처리장치의 필요 성능(감도)과 센서의 설치 위치가 선정되게 된다. 예를 들어 외장형 센서를 CB에 설치시 5 pC에 대한 센서의 출력(P)은 -24 dBm이고 CB에 의한 감쇄율(L)은 24 dB이다. 식 1에 의하여 필요한 신호처리장치의 감도(S)는 -48 dBm이 된다. 이에 따라서 측정기기는 -48 dBm 보다 작은 신호의 처리가 가능해야 하며, 신호처리장치의 성능과 센서의 감도에 따라서 센서의 위치가 선정되는 것이다. 이러한 방식으로 GIS에 구간별 손실과 센서의 감도 그리고 신호처리장치의 감도를 적용하게 되면 변전소에 운영중인 GIS내부에 5 pC PD가 발생시 측정할 수 있는 센서의 배치 위치를 선정할 수 있다.

3. 결 론

CIGRE WG 15/33 과 IEC 에서는 GIS내부 부분방전 진단을 하는데 가장 유효한 방법으로 전자파를 이용한 측정법과 음향 측정법을 제시하였다. 또한 진단시스템을 만들기 위한 측정감도를 걸보기 방전량 5 pC으로 제시하였다. 본 논문에서는 이러한 GIS용 진단 시스템을 적용시 가장 먼저 필요한 센서를 개발하였다. 개발한 센서를 이용하여 IEC-60270에 의한 걸보기 방전량 5 pC 을 측정 할 수 있도록 PD-Cell을 제작하였으며, PD-Cell과 GIS 모의 챔버를 이용한 방전시험으로 센서의 출력 및 주파수의 특성을 확인 할 수 있었다. 본 논문에서 개발된 센서의 성능을 측정결과

- 내장형 센서의 측정 주파수대역은 450 ~ 1500 MHz 이었으며, 외장형센서는 500 ~ 1500 MHz 였다.
- 5 pC의 방전시 내장형센서의 출력은 -18 dBm이며, 외장형센서는 -24 dBm이었다.

또한 제작된 센서를 적용하기 위하여 대상 GIS의 신호 전달 손실을 측정하였다. GIS의 형태 및 내부 장치에 따라서 신호의 감쇄가 각각 다르게 나타났으며, 센서의 출력과 측정기의 감도에 따라 센서를 유동적으로 IEC 또는 CIGRE에 제시한 조건에 적합하도록 최적화하여 배치가 가능하다. 차후 개발된 센서를 이용하여 GIS 감시 진단 시스템에 적용이 가능할 것이며, GIS의 제조사별, 전

압별, GIS형태에 따른 GIS의 손실시험과 측정된 데이터의 적용시 각 GIS의 특징에 따른 세분화된 센서의 최적 배치가 가능하다.

[참 고 문 헌]

- [1] CIGRE Task Force 15/33.03.05 of Working Group 15.03, "Partial Discharge Detection System for GIS: Sensitivity Verification for the UHF Method and the Acoustic Method", Electra, No 183, pp. 75-87, Apr., 1999.
- [2] M Hikita, H Okubo, "Electromagnetic Noise Spectrum Caused by Partial Discharge in Air at High Voltage Substation" IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 13, no. 2, pp. 434-439 April 1998.
- [3] K. H. Weck, F. Weinel, "Noise Reduction in On Site Partial Discharge Measurement by the Use of the Transfer Function" ETEP Vol. 8, No 4, pp. 229-304 July/August 1998.
- [4] Raja Kuppuswamy, Stephan Lelaidier, "Experience with UHF Partial Discharge Measurements", ICDL, Graz, July 7 12, 2002.
- [5] IEC: 60270, "Partial discharge measurement" 2000.
- [6] H. Okubo, Yoshida, T. Takahashi, T. Hoshino, M. Hikita and A. Miyazaki, "Partial Discharge Measurement in a Long distanced SF6 Gas Insulated Transmission Line", IEEE Tran. on Power Delivery, Vol. 13, No. 3, pp. 683 - 689, Jul., 1998.
- [7] 구선근, 박기준, 윤진열, "가스절연개폐장치용 UHF 부분방전검출장치의 새로운 감도 측정방법", 한국전기학회지. 9호. 제50권. SEP. 2001. pp.450 455.