

가스절연개폐장치용 UHF 부분방전검출장치의 새로운 감도 측정방법

論 文

50C-9-5

A Novel Sensitivity Verification Method for the UHF Partial Discharge Detection System in Gas Insulated Switchgear (GIS)

具禪根*·朴基濬*·尹珍烈*
(Sun-geun Goo · Kijun Park · Jin-yul Yoon)

Abstract - We proposed a new sensitivity verification method for the UHF partial discharge(PD) detection system. Initially, we measure the UHF power induced by 5 pC PD which takes place near UHF sensor. Subsequently, we inject the swept UHF signal from a network analyzer into the GIS and measure the attenuation of the signal along the GIS. Both the UHF power by 5 pC PD and the attenuation make it possible to verify the sensitivity and spatial coverage of the PD detection system. This method doesn't require the calibration of injected pulse type UHF signal into the GIS and makes us precisely measure the attenuation in frequency domain.

Key Words : UHF, Partial discharge, GAS, network analyzer

1. 서 론

변전설비 용량의 급격한 증가에 따라 GIS(가스절연개폐장치)의 예방진단에 대한 필요성이 강조되고 있다. 특히 부분방전시 발생하는 UHF(Ultra High Frequency, 극초단파) 신호를 측정하여 GIS의 상태를 감시하는 UHF 부분방전검출기법은 부분방전량의 측정범위(dynamic range)가 넓고, 전파잡음이 거의 없는 GIS의 환경에 적합할 뿐만 아니라, 이상발생위치 및 결함원인의 추정이 용이하여 GIS 예방진단 기법으로 각광받고 있다[1,2]. 본 논문에서는 한전 전력연구원에서 UHF 부분방전검출기법을 위해 개발한 센서 및 센서가 장착될 GIS의 특성을 조사하여 부분방전검출장치의 감도를 측정하고, 센서의 배치간격을 결정할 수 있는 새로운 방법을 제안하고자 한다.

CIGRE는 UHF 부분방전 검출장치가 GIS 측정구간에서 IEC60270법에 의한 최소 5 pC의 결보기방전량 이상을 검출할 수 있는 감도를 가져야 하고 이에 맞게 UHF 센서를 배치할 것을 권고하고 있으며, 이를 펄스발생기를 이용하여 검증하는 방법을 제안하였다[3]. Knapp 등은 CIGRE가 제안한 방법에 대한 실제 적용사례를 제시하였으며[4], Judd[5], Meijer[6] 및 Okubo[7]는 펄스발생기를 이용해 GIS 또는 GL에서 UHF 신호의 감쇠특성을 규명하였다. 펄스발생기를 이용한 방법은 실제 GIS에서 측정할때 UHF 센서에 수십 V 이상의 전압을 인가해야 하며, 펄스발생기가 5 pC 부분방전 신호와 동등한 펄스를 발생하도록 교정해야 하고, 측정된 신호를 푸리에변환해야 주파수에 대한 특성을 알 수 있으며,

특히 1 GHz 이상의 주파수 영역에서 GIS 내에서의 전자파 손실을 쉽게 파악할 수 없다. 그러나 네트워크 분석기를 이용해 교정절차 없이 1 V 이하의 신호를 UHF 센서에 인가하여 비교적 간단하게 UHF 부분방전 검출장치의 감도와 GIS에서의 전자파 손실은 수 GHz 영역까지 정확히 측정할 수 있었으며, 이를 이용해 CIGRE의 권고안을 만족하기 위한 센서의 배치간격을 도출할 수 있었다.

2. 네트워크 분석기를 이용한 UHF 부분방전 검출장치의 감도 측정법

네트워크 분석기를 이용하여 UHF 부분방전 검출장치가 CIGRE 권고안을 만족함을 확인하는 방법은 아래의 세 단계로 구성되어 있다.

2.1 5 pC 부분방전량에 대한 UHF 신호크기 측정

그림 1에서 GIS 내부의 한쪽 끝단에 표준방전량(5 pC) 발생장치를 설치한 후 근접한 곳에 UHF 센서를 설치한다. GIS의 다른 끝에는 UHF 신호의 반사를 막기 위해 전자파 흡수체(RF Absorber)를 장착한다. 표준방전량 발생장치에서 5 pC 부분방전을 발생시킨 후 UHF 부분방전 검출장치(그림 1의 경우 UHF 센서와 오실로스코프)에서 이때의 UHF 전력 P_{5pC} (단위: W)을 측정한다. 측정된 전력은 센서의 특성에 따라 다른 값을 가진다.

2.2 GIS 내 UHF 신호의 감쇠특성 측정

그림 2와 같이 GIS에 UHF 센서 A, B, C를 장착한 후 센서 A를 통해 네트워크 분석기로부터 주파수가 스윕

* 正 會 員 : 韓 電 電 力 研 究 院 先 任 研 究 員
接 受 日 字 : 2001年 5月 15日
最 終 完 了 : 2001年 8月 13日

(sweeping)되는 UHF 신호를 GIS 내부로 주입한다. 주입된 신호의 크기는 센서 B와 C 사이의 구간 M을 거치면서 P_b 에서 P_c 로 감쇠된다. GIS 내부의 UHF 전력에 대해 센서에서 검출되는 전력의 비를 k 라 하고, 센서 B와 C의 k 값이 같다면 센서 B와 C에서 측정된 UHF 신호전력은 kP_b 및 kP_c 가 되며, kP_b/kP_c 은 구간 M에서의 UHF 신호 감쇠율 P_b/P_c 과 같다. UHF 신호 감쇠율(A)은 아래 식과 같다.

$$A(dB) = 10 \log_{10} \left(\frac{kP_b}{kP_c} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{P_b}{P_c} \right) \quad (1)$$

P_b : 감쇠율을 측정코자하는 GIS 구간(그림 2의 M)에 입사되는 UHF 신호의 크기 (W)

P_c : 감쇠율을 측정코자하는 GIS 구간을 통과한 UHF 신호의 크기 (W)

k : $\frac{\text{UHF 센서에서 검출되는 전력}}{\text{GIS 내부에서의 UHF 전력}}$

위에서 설명한 방법은 펄스발생기를 사용하는 방법과는 달리 GIS에 주입되는 UHF 신호의 크기와 주파수특성, 측정시 사용되는 동축선 및 센서의 특성에 대한 교정 없이 각 GIS 구간별 고유한 UHF신호의 감쇠특성을 측정할 수 있다.

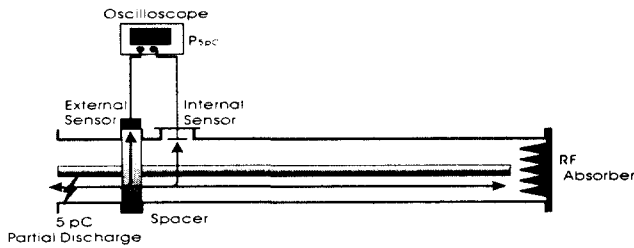


그림 1. UHF 센서를 이용한 5 pC 부분방전 전력 측정.
Fig. 1. Measurement of the 5 pC partial discharge by UHF sensors.

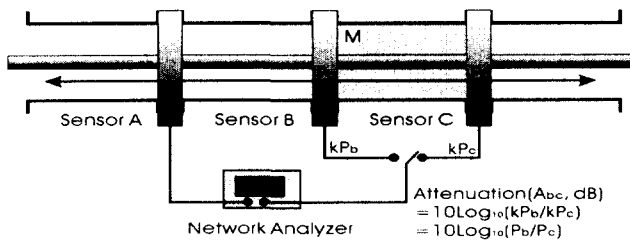


그림 2. 네트워크 분석기와 외장형 센서를 이용한 GIS내 구간 M의 UHF 신호 감쇠율 측정.
Fig. 2. Measurement of the UHF signal attenuation of region M in GIS by network analyzer and external sensor.

2.3 UHF 센서의 배치간격 결정

앞서 측정된 5 pC 부분방전량에 대한 UHF 신호크기 (P_{5pC})와 감쇠율(A)를 이용해 UHF 부분방전검출장치가 CIGRE 권고안을 만족시키는 감도를 가지도록 센서의 배치간격을 결정할 수 있다. 그림 3에서 임의의 구간 M에서 최소 5 pC 부분방전을 검출함은 물론 방전위치까지 산출하기 위해서는 구간 내 한 끝의 센서 B 근방에서 발생한 부분방전 신호를 구간의 다른 끝에 설치한 센서 C에서 검출할 수 있어야 한다. 이때 센서 C에 검출되는 전력 P_{CIGRE} 는 식 2에서와 같이 P_{5pC} 와 측정구간 M에서의 감쇠율 A를 뺀 값이 된다. 이 값이 UHF 부분방전검출장치의 최소 검출가능 전력 P_{min} 이 되는 위치가 CIGRE의 권고안을 만족시키면서 센서의 개수를 최소화 할 수 있는 최적의 설치장소이다. 또한 이미 설치된 센서의 경우 센서의 P_{CIGRE} 를 계산한 다음 이 값이 P_{min} 보다 크거나 같음을 보임으로써 부분방전검출장치가 CIGRE의 권고안을 만족시킴을 확인할 수 있다.

$$10 \log_{10} P_{CIGRE} = 10 \log_{10} P_{5pC} - A \\ = 10 \log_{10} P_c \quad (P_b = P_{5pC}) \\ \geq 10 \log_{10} P_{min} \quad (2)$$

P_{CIGRE} : P_{5pC} 의 방전신호가 GIS내 전파구간에서 감쇠된 후의 전력(W)

P_{min} : UHF 부분방전 검출장치의 최소 검출가능 전력(W)

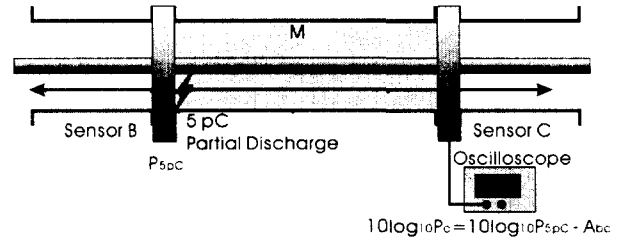


그림 3. UHF 센서의 배치간격 결정
Fig. 3. Determination of distance between two adjacent sensors.

3. 적용사례

3.1 5 pC 부분방전량에 대한 UHF 신호크기 측정

5 bar SF₆ 가스 압력하에서 10 kV의 전압을 인가했을 때 최대 5 pC의 겉보기 방전량을 발생시킬 수 있는 Hampton cell[1]을 제작한 후, 그림 1과 같이 362 kV 베이급 모의 GIS(중양도체직경=120 mm, 외함내경=496 mm)의 한쪽 끝단에 설치하고 cell 가까이에 전력연구원에서 개발한 외장형 센서(External sensor) 및 내장형 센서(Internal sensor)를 각각 장착하였다. 5 pC 부분방전에 대해 센서에서 검출된 UHF 전력 P_{5pC} 은 그림 4와 같은 순서로 측정할 수 있었다.

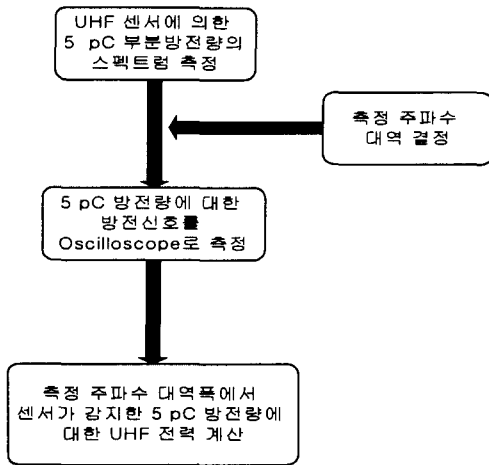


그림 4. 5 pC 부분방전에 의한 UHF 신호의 측정절차.

Fig. 4. Measurement Procedure for UHF signal induced by 5 pC partial discharge.

먼저 그림 5와 같이 스펙트럼 분석기(Rohde & Schwarz, FSP7)로 Hampton cell에서 발생된 5 pC의 부분방전신호의 스펙트럼을 측정하였다. 측정된 스펙트럼으로부터 센서들의 수신강도가 1.6 GHz 이상에서 매우 낮아 측정주파수 대역으로 1.6 GHz 이상은 적합하지 않음을 확인하였다. 또한 0.5 GHz 이하에서는 공기중 코로나 방전 및 방송파 등에 의한 외부잡음이 센서로 유입되기 쉽고, GIS 내부의 방전에 의해 발생된 전자파 중 TEM mode를 제외한 다른 mode의 전자파가 GIS 내부에서 진행할 수 없어 측정대역으로 적합하지 않다. 따라서 측정주파수 대역을 0.5 GHz에서 1.6 GHz사이로 정하였다. 각 센서에 대한 P5pC를 측정하기 위해 먼저 3 GHz 대역폭을 가진 오실로스코프(Tektronix, TDS694C)로 5 pC 단일 부분방전신호를 측정한 뒤 0.5 GHz 고역통과시켜 그림 6 (a)와 같은 측정주파수대역 내에서의 UHF 방전신호를 산출하였다. 이를 이용해 측정된 부분방전신호의 에너지 E는 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$E(t) = \frac{V^2(t)}{R} \Delta t \quad (3)$$

V: 측정주파수 대역에서 부분방전 신호 전압

R: 오실로스코프의 특성 임피던스 (50Ω)

Δt: 오실로스코프의 샘플링 간격

계산된 에너지를 그림 6 (b)와 같이 0초(부분방전신호 시작점)에서부터 누적한 에너지 E_T를 식 4와 같이 계산하여 그래프로 나타내면 약 100 ns 이상부터 거의 포화됨을 알 수 있다[8].

$$E_T(t) = \int_0^t E(x) dx \quad (4)$$

따라서 각 센서에 대한 P_{5pC}은 포화된 누적에너지의 80%가 되는 시간(그림 6 (b)의 A)으로 이때의 누적에너지(그림 6 (b)의 B 또는 B')를 나누어 계산 할 수 있다. 내장형 센서의 P_{5pC}는 -20 dBm (9 μW) 이고 외장형 센서의 경우는 -29 dBm (1.3 μW)으로 측정되었다.

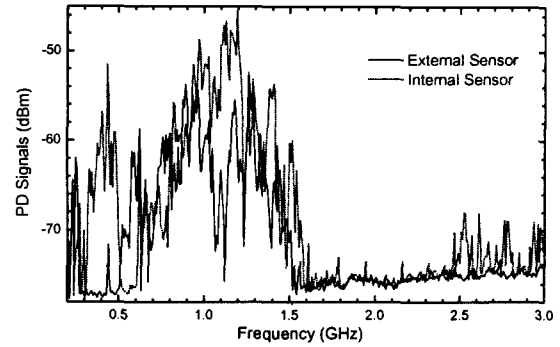
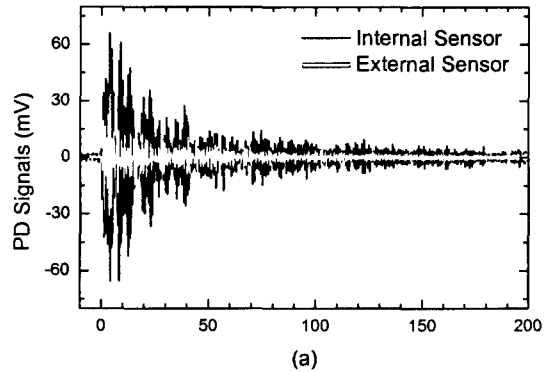
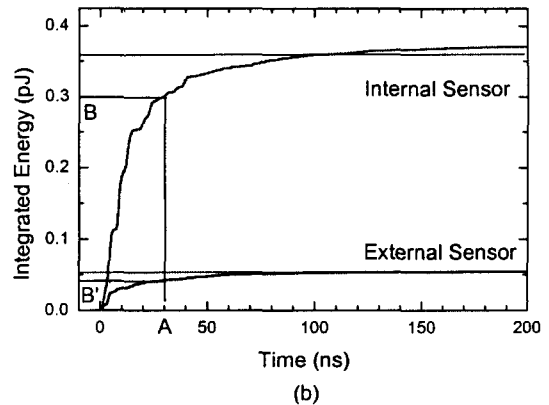


그림 5. 5 pC 부분방전에 대한 UHF 신호의 스펙트럼.

Fig. 5. Spectrum of UHF signals induced by 5 pC partial discharge.



(a)



(b)

그림 6. 측정주파수대역에서 센서로부터 측정된 5 pC 부분방전신호 (a)와 누적에너지 (b).

Fig. 6. 5 pC partial discharge signals between 0.5 and 1.6 GHz (a) and their integrated energy (b).

3.2 GIS 내 UHF 신호의 감쇠특성 측정

운전중인 362 kV급 GIS에서 UHF 신호의 감쇠를 외장형 센서로 측정하였다. 먼저 GIS를 표 1과 같이 6개의 기본구간으로 나누고 이에 대한 감쇠율을 측정하였다. 예를 들어 그림 7과 같이 Γ 1-CB- Γ 2로 구성된 section CB(Circuit Breaker)에서 네트워크 분석기 기능을 할 수 있는 스펙트럼 분석기(Rohde & Schwarz, FSP7)의 네트워크 모드를 이용해 스위핑 되는 신호(스위핑 범위: 9 kHz ~ 3 GHz)를 스페이스 S11에 장착한 외장형 센서를 통해 GIS 내부에 주입한 후, 스페이스 S12, S13, S14에서 동일한 특성의 외장형 센서로 감쇠된 신호를 그림 8과 같이 측정하였다. 그림 8의 base line은 스위핑 신호가 인가되지 않았을 때 측정된 잡음을 표시한 것이다. 스페이스 S12에서 측정한 신호에 S13에서 측정한 신호를 빼면 그림 9와 같이 주파수 영역에서 CB의 UHF 신호 감쇠율을 알 수 있다. 이때 S12 및 S13가 base line보다 큰 범위(그림 7의 A)에서 측정된 감쇠율이 유효하다.

표 1. GIS의 기본 구간.

Table 1. Elementary UHF propagation paths in the GIS.

기본구간 명칭	기본구간내 구성물	감쇠율 (dB)
CB	CT 포함	23
버스	베이로의 T자 분기 3개 포함, 길이 12 m	11
+자	부싱 및 +자 분기	5
GIL	베이, 길이 9 m	7
Γ 자	버스와 CB 구간 사이, ES 및 DS 1개씩 포함, L자 분기 1개 포함	7
Crank	CB와 +자 구간 사이, ES 및 DS 1개씩 포함, L자 분기 2개 포함	9

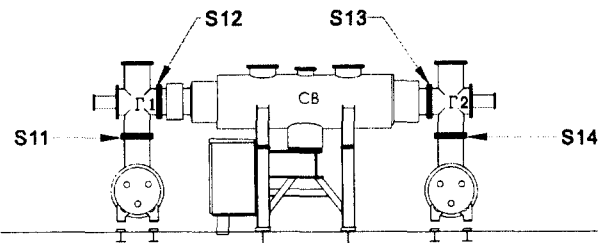


그림 7. Section CB의 형상, S11, S12, S13, 14: 외장형 센서의 취부위치.

Fig. 7. Generalized view of the section CB, S11, S12, S13, S14: External sensor positions for attenuation measurement.

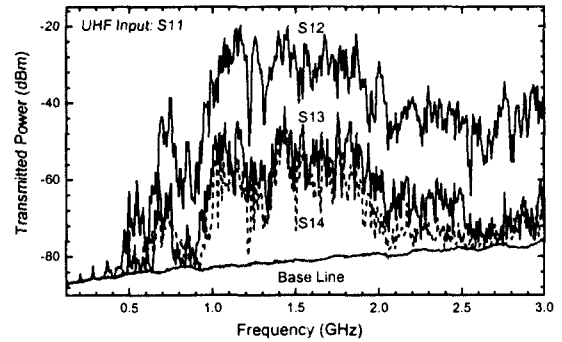


그림 8. Section CB에서 UHF 신호의 투과량.
Fig. 8. Transmission of UHF Signal in Section CB.

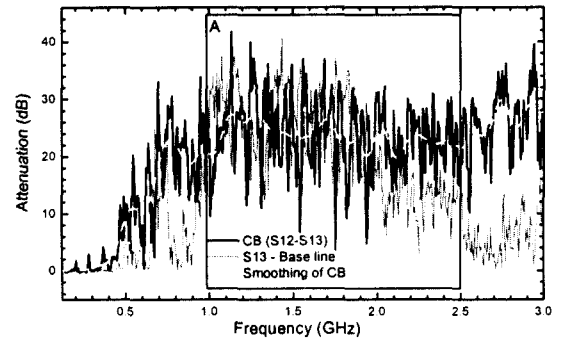


그림 9. CB 구간에서의 감쇠율.
Fig. 9. UHF Attenuation at CB.

CB에서의 UHF 신호의 감쇠율을 살펴보면 표 2와 같이 감쇠율이 특히 높은 주파수가 존재한다. 이는 특정 주파수 대역에서 GIS내부에 정상파가 나타날 수 있고, GIS의 반사 필터 역할을 하기 때문이다. 협대역으로 부분방전을 측정할 경우 이들 주파수를 사용하지 않아야 정확한 방전신호를 측정할 수 있다.

표 2. CB에서 감쇠율이 높은 주파수 대역.

Table 2. Frequencies with high attenuation rate at CB.

주파수(GHz)	1.13	1.25	1.35	1.49	1.56	1.69
감쇠율 (dB)	41.7	39.9	36.0	36.0	37.0	36.9

측정한 감쇠율은 그림 9의 영역 A 내의 주파수 대역에서 유효하나, 연속한 20 개의 점을 평균처리하면 그림 9의 점선에서와 같이 주파수에 대해 심한 변동이 없었다. 따라서 감쇠율은 주파수에 관계없이 거의 일정한 값을 가짐을

알 수 있으며, 영역 A에서의 감쇠율의 평균값은 UHF 센서의 측정범위로 결정한 0.5 - 1.6 GHz에서도 적용가능하다. 이렇게 계산된 GIS의 기본구간별 감쇠율은 표 1에서와 같이 GIS의 구조에 따라 다양한 값을 보인다. 특히 Hampton 등이 언급한 바와는 다르게 CB에서 높은 감쇠율을 보였다[8]. 이는 362 kV CB가 전자파가 진행하기 어려운 복잡한 구조를 가지고 있기 때문이다. 또한 기본구간별 감쇠율은 Meijer 등이 pulse generator로 측정한 결과와는 다르게 구간 주위의 GIS의 형상에 관계없이 거의 일정한 값을 가짐을 알 수 있었다[6].

3.3 UHF 센서의 배치기준

측정한 각 센서의 P_{5pC} 과 GIS 기본구간별 감쇠율 A 및 식 2를 이용하여 GIS 감시구간 내에서 최소 5 pC의 부분방전량을 측정할수 있는 감도를 가지도록 센서의 배치간격을 결정할 수 있다. 그림 7과 같이 $\Gamma 1$ -CB- $\Gamma 2$ 로 구성된 GIS 구간에서 스페이서 S11에 외장형 센서가 배치되었다면 S11으로부터 각 구간별 P_{CIGRE} 는 표 3과 같다. UHF 부분방전검출 장치의 최소 검출가능 전력 P_{min} 이 -59 dBm인 검출장치를 사용한다면 스페이서 S13에서의 P_{CIGRE} 가 -59 dBm로 P_{min} 와 같기때문에 외장형 센서를 부착하기 위한 최적지가 되며, P_{min} 가 -66 dBm인 검출장치의 경우 스페이서 S14에 외장형 센서를 부착하는 것이 CIGRE 권고안을 만족시키면서 센서의 간격을 최대한 늘릴 수 있는 방법이다. P_{min} 은 부분방전 검출장치의 제조사에 따라 다르며, 사용하는 신호증폭기, 동축선 및 기타 부속품에 의존한다.

표 3. 외장형 센서에 대한 각 구간별 P_{CIGRE} .

Table 3. P_{CIGRE} according to UHF propagation paths for External Sensor.

GIS 구간	외장형 센서의 P_{5pC} (dBm)	감쇠율 A (dB)	P_{CIGRE} (dBm)
$\Gamma 1$ (S11-S12)	- 29 dBm	7	-36
$\Gamma 1$ -CB (S11-S13)		30 (7+23)	-59
$\Gamma 1$ -CB- $\Gamma 2$ (S11-S14)		37 (7+23+7)	-66

4. 결 론

네트워크 분석기를 이용하여 GIS용 UHF 부분방전 검출 장치가 CIGRE 권고안을 만족시킴을 보일 수 있는 새로운 방법을 제안하였다. 5 pC 부분방전에 대한 센서의 수신강도를 측정하고, GIS의 UHF 신호감쇠율을 네트워크 분석기로 측정한 후, 이를 토대로 CIGRE 권고안에 대한 만족여부를 계산하고, 센서의 배치간격을 결정하였다. 이 방법은 운전중인 GIS에서도 활용이 가능하며, 1 GHz 이상의 주파수 영역에서 GIS 내 부분방전신호의 감쇠율을 정확히 측정할 수 있었다. 또한 주파수 스위핑 방식이므로 작은 출력의 UHF 신

호로 GIS 내 UHF 신호의 감쇠율을 측정할 수 있음은 물론, 한번의 스위핑된 신호의 인가로 여러 GIS구간의 감쇠율을 동시에 측정할 수 있었다. Pulse generator를 사용하는 방법과 달리 펄스 및 기타 측정부품의 교정절차가 필요치 않았으며, 측정한 GIS 구간별 감쇠율은 센서의 특성과 무관한 GIS의 고유 특성이므로 장착되는 센서의 특성이 바뀌더라도 그 센서의 P_{5pC} 만을 측정함으로써 센서의 배치간격을 쉽게 결정할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] B. F. Hampton and R. J. Meats, "Diagnostic measurements at UHF in gas insulated substations", IEE Proc., Vol. 135, Pt. C, No. 2, Mar., 1988.
- [2] CIGRE Task Force 15/23-01 of CIGRE Working Group 15.03, "Diagnostic methods for GIS insulating systems", CIGRE 1992 Session, 30 Aug. - 5 Sep., 1992.
- [3] 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.
- [4] M. Knapp, R. Feger, K. Feser and A. Breuer, "Application of the CIGRE-Sensitivity Verification for UHF PD Detection in Three-Phase GIS", Proc. 11th ISH, London, 1999
- [5] M. D. Judd, J. S. Pearson, O. Farish and B. M. Pryor "In-service Measurements of UHF Attenuation in a Gas Insulated Substation", No. 183, pp. 22 - 27, Aug., 1999.
- [6] Sander Meijer, Andrea Bovis, Edward Gulski, J. J. Smit and A. Girodet, "Analysis of the Sensitivity of the UHF PD Measuring Technique", Conference Record of the 2000 IEEE International Symposium on Electricla Insulation, pp. 395 - 399, Apr., 2000.
- [7] H. Okubo, . Yoshida, T. Takahashi, T. Hoshino, M. Hikita and A. Miyazaki, "Partial Discharge Measurement in a Long Distance SF6 Gas Insulated Transmission Line", IEEE Tran. on Power Delivery, Vol. 13, No. 3, pp. 683 - 689, Jul., 1998.
- [8] B. F. Hampton, J. S. Pearson, C. J. Jones and T. Irwin, "Experience and Progress with UHF Diagnostics in GIS", CIGRE Task Force 15/23-03, CIGRE 1992 Session, 30 Aug. - 5 Sep., 1992.

저 자 소 개



구 선 근 (具 禪 根)

1967년 10월 16일 생. 1986년 연세대 물리학과 졸업. 1994년 동 대학원 물리학과 졸업(석사). 현재 한국전력공사 전력연구원 선임보조연구원

Tel : 042-865-5896, Fax : 042-865-5844

E-mail : freeon@kepri.re.kr



윤 진 열 (尹 珍 烈)

1956년 3월 15일 생. 1982년 성균관대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 충남대 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 한국전력연구원 전력계통연구실 선임연구원

Tel : 042-865-5872

E-mail : jyyoon@kepri.re.kr



박 기 준 (朴 基 濬)

1968년 생. 1991년 인하대 공대 응용물리학과 졸업. 1993년 Univ. of Central Florida 전기전자공학과 졸업(석사). 1997년 Univ. of Central Florida, 전기전자공학과 졸업(공학). 1996 - 현재 전력연구원 전력

계통연구실 선임연구원.

Tel : 042-865-5895, Fax : 042-865-5804,

E-mail : killer@kepri.re.kr.