

## 부분방전 측정용 UHF센서의 설계

박경수, 김정배, 송원표, 김덕수  
(주) 효성 중공업연구소

## A Design of UHF Sensor using Partial Discharge Measurement in GIS

K.S. Park, J.B. Kim, Y.P. Song, D.S. Kim  
Hyosung Corporation

**Abstract** - The PD in GIS leads to a charge transfer and a voltage drop across the discharge area. They cannot be measure directly, but we can measure electromagnetic wave made by PD. In generally, compared with VHF band, electromagnetic waves of UHF band have a low noise. therefore, we can detect the real defect with several pC in GIS using UHF method. In this paper, the U-slot microstrip patch antenna for measuring PD signal in GIS is presented. the proposed UHF sensor are designed to have large band characteristics and unaffected structure for GIS operation.

## 1. 서 론

GIS(Gas Insulated Switchgear)는 전력계통을 이상전압에서 보호하기 위한 장치로 만약 이 기기에 이상이 발생하게 되면 전체 계통 전체에 심각한 피해를 줄 수 있다. GIS는 설계시에 20년의 내구성을 가지도록 설계되며, 실제로는 30년 이상을 사용할 수 있을 만큼 안정성이 뛰어난 장비이지만, 부스(BUS)안은 매우 높은 고전계 상태이므로 제품의 조립, 운반 또는 운전 중에 발생할 수 있는 도체이물질 같은 아주 조그마한 결함에 의해서도 절연파괴가 발생할 수 있다. 이러한 GIS 절연파괴의 원인에는 부스 바닥의 도체 이물질, 스페이서의 크랙, 스페이서 표면에 부착되는 도체 이물질, 스페이서 내부의 보이드, 도체돌기 등이 있다. GIS는 구조적으로 밀폐되어 있기 때문에 내부에 결함이 있더라도 사고로 발전하기 전에 결함을 검출하고 대책을 세우기가 매우 어렵다. 특히, 위와 같은 결함원은 초기에는 수 pC의 매우 적은 방전량을 가지므로 공장 또는 현지에서 이루어지는 내전압 시험, IEC 60270에 의한 부분방전시험 등을 통해서 사전에 검출이 현실적으로 어렵다. 또한, 운전중의 GIS에 대해서는 더욱 더 곤란하게 되는데, 이와 같은 운전중의 GIS에 대해 결함의 정도 및 원인을 측정 위험도를 진단할 수 있는 부분방전 검출법이 요구되고 있으며, 이러한 방법 중에 가장 대표적인 것이 UHF대역의 부분방전펄스를 검출하는 UHF 부분방전 측정법(이하 UHF법)과 초음파법이 있다. [1][2][3] [4][5]

UHF법은 부분방전이 발생했을 때 발생하는 전자파 펄스를 검출하는데 잡음의 영향이 VHF대역(30MHz~300MHz)에 비해 상대적으로 적은 UHF대역(300MHz~3GHz)을 사용한다. UHF법은 다른 부분방전 측정법에 비해 고가의 센서, 증폭기, 스펙트럼 분석기, 오실로스코프를 사용하므로 초기 투자비용이 매우 높지만 수 pC의 도체 이물질을 검출 할 수 있으며, 결함의 원인 및 위험도에 대한 진단이 가능하여 매우 높은 정밀도와 신뢰도를 가지고 있다. 현재 선진 외국의 GIS 메이커들은 UHF법을 현장에 적용하고 있으며, 국내에도 일부 변전소에서 해외의 제품을 수입하여 적용하고 있다.

부분방전에 의한 전자파 펄스를 분석하기 위해서는 오

실로스코프나 주파수 분석기를 이용해 시간특성과 주파수 특성을 주로 관찰하는데, UHF대역 중에서 대략 1GHz 정도의 넓은 주파수 대역을 분석하는 방법(wide band method)과 특정한 주파수를 정하여 분석하는 방법(narrow band method)으로 크게 나눌 수 있다. 본 논문에서 이용하는 부분방전 분석법은 광대역의 부분방전 센서를 이용해 얻어진 부분방전 펄스 신호중 부분방전 신호로 예상되는 특정신호에 대한 위상분석을 통해 결함의 원인을 진단하는 방법으로 위의 두 가지 방법의 장점을 결합한 형태라 할 수 있다. 이 방법은 광대역 센서, 증폭기, 주파수 분석기, 진단프로그램으로 크게 구성되는데 광대역 주파수에 대한 스케닝을 통해, 결합에 의해 발생하는 특정 펄스대역을 찾아내고 60Hz 주기동안의 위상특성을 분석함으로써 UHF법 적용시 가장 어려운 문제인 노이즈의 영향을 최소화 할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 시스템에 적용할 수 있는 초광대역 UHF 부분방전센서의 설계요건과 이러한 요건을 만족하도록 설계된 센서에 대해 논하고자 한다.

## 2. 본 론

## 2.1 센서의 요구특성

부분방전은 1ns 이하의 펄스형태를 띄므로 이때 발생하는 전자파 신호는 거의 전대역에 걸쳐 분포하게 된다. 그러나, 대기중에는 방송국의 지구국이나, 이동통신기에 의한 매우 강력한 전자파들이 항상 존재하며, 특히 변전소에서는 이것들 이외에도 송전선로의 기중방전에 의한 외부 노이즈가 있어 부분방전 신호와 외부 노이즈의 구별이 쉽지 않다. UHF법은 일반적으로 UHF대역에서 이러한 전자파 잡음의 영향이 상대적으로 적은 500MHz 이상을 이용하며, 고가의 장비 문제로 주로 1500MHz 이하를 이용한다. [6]

UHF법에 이용되는 센서는 이러한 주파수 대역에서 이용할 수 있어야 하며, 설치되는 조건에 따라 구조적 제한을 가진다. 즉, 내장형 센서의 경우 GIS에 영향을 주지 않도록 평평한 구조 및 돌출 부위가 없어야 하며, 6bar 이상의 고압가스 안에서 GIS와 동등한 수명을 가져야 한다. 또한 외장형 센서의 경우는 스페이서에 취부될 수 있도록 폭이 작아야하고, 외부 노이즈의 영향이 최소화 될 수 있는 구조여야 한다.

## 2.1.1 주파수 대역

변전소의 전자파 잡음은 주위의 이동통신 지구국, 및 방송국의 위치, 사용주파수에 의해 영향을 받으며, 송전선로의 위치 및 형태에 의해서도 영향을 받을 수 있다. 또한, 측정시간에 의해서도 평균에 따른 외부 잡음이 갑자기 나타나다가 사라지기도 한다. 이러한 UHF대역의 전자파 잡음 중 특히, 통신용으로 사용되는 장치에는 무선 CCD 카메라(506~536MHz), UHF TV(470MHz~760MHz), Cellula Phone(824~894MHz), 아마추어 무선통신(1260~1300MHz), GPS(1574MHz),

PCS(1750~1870MHz)등 매우 다양하며, 특히 UHF TV 대역은 거의 전지역에서 걸쳐 존재한다. 그림 1은 765kV 변전소에서 외장형 UHF 부분방전 센서를 이용해 측정된 전자파 잡음의 모습이다.

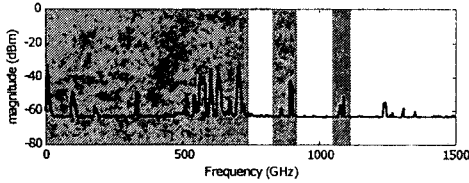


그림 1 변전소의 전자파 잡음  
Fig. 1 Electromagnetic Noise in substation

GIS 외부의 전자파 노이즈는 위상분석을 통해 노이즈 인지 결합인지 구별이 가능하지만, 부분방전은 일반적으로 광대역에 걸쳐 존재하므로 효과적인 부분방전 신호 검출을 위해서는 그림1과 같은 특정주파수 대역을 제거하여야 한다.

본 논문에서 사용하는 부분방전 측정법은 변전소 현장에서 부분방전 측정시 초기에 진단 프로그램 안에서 외부의 강력한 노이즈를 제거한 영역을 검출 주파수 대역으로 사용하므로, 변전소에서 거의 공통적으로 매우 큰 값이 측정되는 UHF TV 대역(470MHz~760MHz)은 항상 사용주파수에서 제외되었다.

따라서, 본 논문에서는 760MHz이상의 UHF 대역을 센서의 사용주파수로 사용하려고 한다. 이렇게 함으로써 실제 사용하는 주파수의 특성을 강화함으로써 센서의 감도를 향상시킬 수 있으리라 판단된다.

### 2.1.2 감도 평가기준

CIGRE에서는 부분방전 측정 시스템 감도기준으로 5pC의 부분방전을 검출할 수 있도록 권고하고 있으며, 이를 펄스발생기를 이용해 확인하는 방법을 제안하고 있다. 하지만, 이 방법은 센서의 자체에 대한 감도기준은 될 수 없다. UHF센서는 전자파를 검출한다는 의미에서 전파통신용 안테나와 비슷한데, 일반적으로 센서는 신호 검출과 크기측정에 목적이 있다면 안테나는 신호를 전달하는데 목적이 있다.

안테나의 사용 주파수 대역은 정재파비(SWR : Standing Wave Ratio) 2이하를 기준으로 하며, 되도록 정재파비 1.5이하를 요구한다. 정재파비가 1.5일 때 반사손실은 14dB, 반사율은 4%이며, 정재파비가 2일 때 반사손실은 9.54dB이며 반사율은 11%이다.

UHF센서가 UHF대역 전체에서 안테나 수준의 감도를 갖는 것은 그 구조적 제한으로 인해 매우 어려운 일이다. 하지만, 안테나가 열린 공간에서 사용되는데 비해 센서는 GIS 부스라는 전자파를 검출하기 유리한 구조에서 사용되므로 센서 자체의 감도는 이 이하가 되어도 충분한 감도를 가질 수 있다. 이와 같은, 안테나의 관점에서 UHF센서를 설계하기 위해, 편의상 센서의 감도를 반사손실 -5dB(SWR 3.6, 반사율 32%)를 기준으로 하고자 한다.

### 2.1.3 방사패턴 (Radiation Pattern)

부분방전에 의해 발생하는 전자파 펄스는 TEM, TE, TM모드의 다양한 복합모드 특성을 가지며, 센서가 취부되는 부스는 양방향에서 신호가 들어오므로, 센서는 무지향성이어야 한다. 즉, 센서의 주엽(Major Lobe)이 커서 전방향의 부분방전 전자파 신호를 받아들일 수 있어야 한다.

### 2.1.4 구조적 특징

내장형 UHF센서는 GIS와 동등한 수명을 가져야 하며, 전계가 모이지 않는 평탄한 구조를 가져야 한다. 또한, UHF센서가 주로 취부되는 점검창의 크기보다 작아야 한다.

GIS 내부는 고압가스로 충전되어 있으므로 가스누기가 없도록 기밀구조로 설계가 가능하여야 하며, 충분한 경제성을 가질 수 있도록 제작이 간단하여야 한다.

## 2.2. 설계한 UHF센서

기존의 내장형 UHF센서들은 커플러형(원형 패치안테나)이나 다이폴형(반파장 다이폴 안테나의 변형)을 주로 사용하고 있다. 이러한 센서들은 GIS 내부에 취부할 수 있도록 등글고 전계가 모이지 않는 구조로 설계되었으며 광대역화 하기 위해 다양한 방법을 이용하고 있다. 일반적인 상용 안테나들은 광대역화하기 위하여 ①고유전율의 유전체를 이용해 이중공진을 이끌어내는 기법, ②서로 다른 주파수 특성을 가지는 안테나들을 배열(Array)하는 기법, ③Biconical이나 Sprial, Bow-Tie 같은 광대역 특성을 가지는 특정한 안테나의 형태를 이용하는 방법을 주로 이용한다. 본 논문에서는 이러한 방법들 중에서, GIS에 취부하기 쉽고, 전계가 모이지 않으며, 쉽게 광대역화 할 수 있으며, 제조도 용이한 사각 마이크로스트립 패치 안테나를 UHF센서로 적용하고자 한다.

일반적인 마이크로스트립 패치 안테나는 유전체 기판에 프린트하여 사용하므로 가격이 매우 저렴하며 제조가 쉬운 반면 광대역화하기 쉽지 않은 단점을 가지고 있다. 하지만, 근래에는 매우 다양한 광대역화 할 수 있는 방법들이 개발되고 있으며, 본 논문에서는 U자형의 슬롯(Slot)을 패치에 만들어 이중공진을 이끌어내어 광대역화 할 수 있었다.

U슬롯 마이크로스트립 패치 안테나의 유전체는 저손실 유전체인 테프론을 사용하였으며, 내압구조로 설계되었다.

## 2.3 센서의 형태

설계된 UHF센서의 형태는 그림 2와 같다. 센서는 점검창에 취부되도록 설계되었으며 테프론 유전체는 패치보다 크도록 설계하였다.

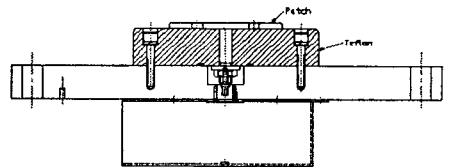


그림 2 설계된 센서의 형태  
Fig. 2 Type of Designed Sensor

### 2.3.1 센서 설계방법

근래 컴퓨터 기술의 향상 및 관련 해석기술의 발달로 패치 안테나 해석 및 설계에는 HFSS, IE3D, Ensemble등 매우 다양한 설계 툴들이 널리 이용되고 있으며, 정확도도 매우 높다. 본 논문에서 설계된 UHF센서는 Moment of Method(MOM)법에 기초한 Ensemble을 이용하였다.

센서를 설계하는 방법은 900MHz정도의 공진주파수를 가지도록 사각 패치를 설계하고 슬롯을 이용해 이중공진을 유도한 다음 유전체의 크기를 조절하는 방법을 이용하였다. 센서의 공진주파수는 패치의 크기와 유전체의 두께와 위치를 조절함으로써 제어가 가능하다.

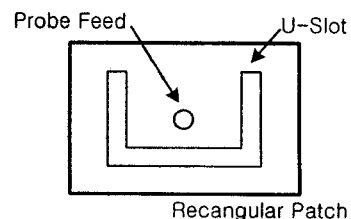


그림 3 UHF 센서의 패치 부분  
Fig. 3 Patch part of UHF Sensor

### 2.3.2 시뮬레이션 결과

센서의 Ensemble 시뮬레이션 결과는 그림 4와 같다. 반사손실 -5dB를 기준으로 하였을 때 749MHz~1690MHz가 사용대역이며, 안테나의 사용대역인 반사손실 -10dB를 기준으로 하였을 때는 785MHz~1383MHz가 사용대역이다. 일반적으로 부분방전측정에 사용되는 500MHz~1500MHz대역에서 500MHz~749MHz까지는 반사손실 -5dB를 만족하지 못하고 있지만, 사용대역 전반에서 반사손실 -10dB이상의 좋은 특성을 가지고 있다. 특히, 실제 부분방전 측정시 노이즈가 매우 강하여 제거되는 UHF TV대역(470MHz~760MHz)을 제외한다면 UHF센서로서 충분히 적용가능하리라 판단된다.

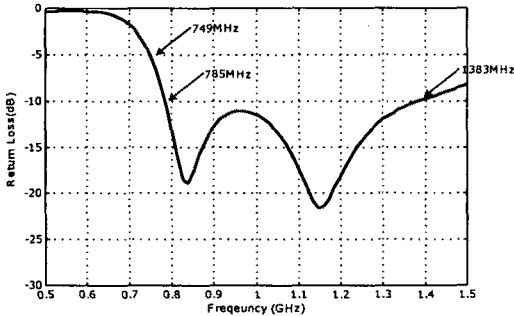


그림 4 반사손실  
Fig. 4 Return Loss

U-슬롯 마이크로스트립 패치 안테나를 500MHz~1500MHz까지 사용하기 위하여 패치의 형태와 유전체의 크기를 조절하면 전대역에 걸쳐서 사용 가능하지만, 이러한 경우 부분방전 검출시 실제로 사용되는 대역 전반에 걸쳐 센서의 이득이 매우 낮아지므로 일부 대역을 제외하였다. 본 논문에서 설계한 센서는 -5dB기준시 941MHz의 대역폭을 가지는데 만약 -5dB시작 주파수를 780MHz로 해서 설계한다면 2GHz이상까지 -5dB 이상의 성능을 가지도록 만들 수 있다.

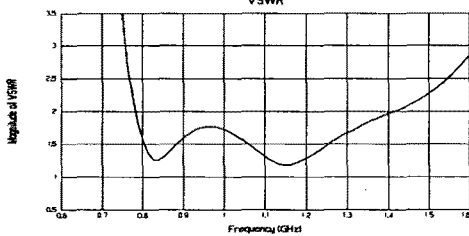


그림 5 정재파비  
Fig. 5 SWR(Standing Wave Ratio)

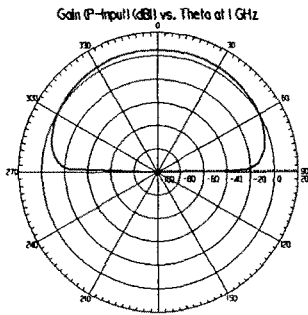


그림 6 방사패턴 (Far Field)  
Fig. 6 Radiation Pattern

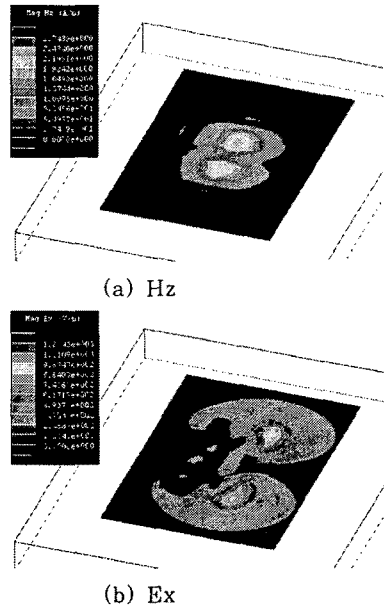


그림 7 방사패턴 (Near Field)  
Fig. 7 Radiation Pattern

### 3. 결론

GIS의 부분방전 측정용 UHF 센서를 설계하였다. 안테나 이론을 적용하여 센서의 특성을 정의하였고, 안테나 해석틀인 Ensemble을 이용해 주파수 특성과 방사패턴 등을 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션 결과 UHF TV 대역을 제외한 부분방전 측정 주파수 영역에서 반사손실 -5dB이상의 좋은 성능을 얻을 수 있었으며, 무지향성의 좋은 방사패턴을 얻을 수 있었다.

설계한 센서는 현재 제작중이며 제작이 완료되면 센서의 주파수 특성을 네트워크 분석기를 이용해 측정하여 분석하고, 부분방전 테스트 챔버에 설치하여 실제 부분방전에 대한 응답특성을 확인할 할 예정이다.

### 참고 문헌

- [1] J.B.Kim, M.S.Kim, K.S.Park, W.P.Song, D.S.Kim, "Development of Monitoring and Diagnostic System for SF6 Gas Insulated Switchgear", IEEE Conference record of the 2002 IEEE International symposium on Electrical Insulation, April 7-10, 2002, 453-456
- [2] M.D.Judd, O.Farish, B.F.Hampton, "The Excitation of UHF Signals by Partial Discharges in GIS", IEEE Trans. dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 3, No. 2, April 1996.
- [3] R.Kurrer, K.Feser, "The Application of Ultra-High-Frequency Partial Discharge Measurements to Gas-Insulated Substations", IEEE Tras. on Power Delivery, Vol.13, No.3, July 1998
- [4] Fumihiro Endo, "Risk Assessment of Defects in GIS by PD Diagnostics", CIGRE WG15-03 TF15.03.09 Munchen Meeting, March, 2000
- [5] M.runde, T.Aurud, L.E., Lundgaard, G.E.Ottesen, K.Faugstad, "Acoustic Diagnosis of High Voltage Circuit-Breakers", IEEE Trans. on Power Deliver, Vol.7, No.3, July 1992
- [6] C.Neumann, B.Krampe, R.Feger, K.Feser, M.Knapp, A.Breuer, V.Rees, "PD Measurements on GIS of different designs by non-conventional UHF Sensors", CIGRE 2000, 15-305