

UHF 부분방전 센서 보정을 위한 표준 전자계 생성 장치

이상화, 선종호, 김광화, 강동식  
한국전기연구원

Standard EM-field Producing Instrument for UHF PD Sensor Calibration

Sang-Hwa Yi, Jong-Ho Sun, Kwang-Hwa Kim, Dong-Sik Kang  
Korea Electrotechnology Research Institute (KERI)

**Abstract** - 대상 전력기기와 위치가 정해지지 않은 상태에서 UHF 부분방전 센서의 성능 측정시, 유효높이는 유용한 파라미터이며 이를 용이하게 측정하기 위해서 표준전계 발생장치가 필요하다. 표준전계를 발생을 위해 평행판 전송선로 형태의 TEM Line을 설계 제작하였으며, 제작된 TEM Line의 특성을 살펴보고, 표준프로브법을 이용하여 TEM Line의 내부 전계를 보정하기 위한 실험을 실시하였다.

1. 서 론

GIS에서 UHF법을 이용한 부분방전의 검출 방법은 온라인 절연 감시진단에 유용하고, 감도가 좋은 방법임이 알려지면서 중요시 되고 있다[1-3]. 가스절연공간인 GIS 내부의 부분방전은 짧은 펄스 모양의 전자파 신호를 방출하는 것으로 알려져 있으며[4], UHF법은 이 신호를 커플링 센서를 이용하여 측정한다.

이러한 UHF 부분방전 센서의 성능을 측정하기 위한 여러 가지 방법들이 모색되고 있으며, 실 사용될 GIS에 센서를 취부한 후, 반사계수를 측정하거나, 실 부분방전이나 이를 모의한 신호를 발생 시킨 후 방전량을 측정하는 방법 등이 적용되고 있다[5]. 이러한 방법들이 정확하고 납득 할 만하지만, 실 사용될 모든 GIS의 위치와 상황에 따라 측정해야하는 문제가 있다. 이에 GIS의 내부 전계 상황과 유사한 모의 전계발생 장치를 이용하여 센서 자체의 성능을 측정하는 방법이 제안되고 있다[6].

본 논문에서는 이러한 표준전계 발생장치로 비교적 구조가 간단한 평행판 전송선로 형태의 TEM Line을 선정하고, 설계 제작하였다. 제작된 TEM Line의 특성을 시뮬레이션과 실험을 통해 살펴보고, 표준프로브법을 사용하여 TEM Line 내부의 전계를 보정하기 위한 실험을 실시하였다.

2. 본 론

2.1 UHF 부분방전 센서의 유효높이

센서의 성능을 나타낼 때 안테나의 경우 주로 전력이득(Power Gain)을 사용한다. 전력이득은 단위체적각(unit solid angle)당 주방향으로 방사된 전력의 4배와 전력 원으로부터 센서로 받은 순 전력크기의 비로 정의된다. 그러나 부분방전 측정에 사용되는 전자파 센서는, 자유공간이 아니라 전력기기등의 도체 구조물에 큰 영향을 받는 조건에서 사용되므로, 원역장의 지향성이 중요한 요소인 안테나의 전력이득을 그대로 사용하는 것은 적절 하지 않다.

부분방전 측정용 전자파 센서의 성능은 취부되는 전력기기의 전기적 구조와 매우 밀접한 관계를 갖기 때문에, 기본적으로 센서를 실제 사용될 전력기기의 위치에 설치한 후 그 성능을 평가하는 것이 올바른 방법이다. 그러나 GIS의 경우, 정확한 대상 설비와 위치가 정해지지 않

은 상태의 센서 자체 성능을 평가하기 위해, 센서의 유효높이  $H_e$ 를 특성 파라미터로 사용 할 수 있다[6].

일반적으로 센서가 설치된 위치인 GIS외함 위치에서, GIS내부의 경계조건에 의해 전계의 반지를 방향 성분  $E_r$ 이 매우 우세하다고 가정하면,  $E_r$ 로 인한 센서로의 전계 커플링이 주로 이루어 질 것이다. 이 상황에서는, 센서가 GIS 외함의 내부반경에 독립적인 특성을 갖게 되고, 표준전계  $E_r$ 에 반응하는 센서의 출력만을 측정하면, 센서의 특성을 파악하기 쉽다.

다음 식(1) 과 같이 센서의 유효높이  $H_e$ 는, 센서에 표준 전자기장  $E_r$ 을 가했을 때, 그 전자기장과 센서의 출력  $V_0$ 사이의 전달함수 이다.

$$V_0(\omega) = H_e(\omega)E_r(\omega) \tag{1}$$

센서의 전달함수는, 주파수 영역에서 입력전계  $E_r=1 \text{ Vm}^{-1}$ (이때  $E_r$ 는 센서 표면에 수직인 전계를 의미한다)에 대한 출력전압을 측정하여 구한다. 단위는  $\text{V/m(Vm}^{-1}\text{)}$ 나  $\text{m}$ 이다.

센서의 성능 파라미터로 유효높이를 사용하면, GIS의 크기와 센서의 취부 위치에 관계없이 센서만의 성능을 편리하게 측정할 수 있다. 하지만 유효높이는 GIS내부에 인가되는 전계의 반지를 방향 성분  $E_r$ 만을 고려한 함수이기 때문에,  $E_r$ 성분이 아닌 주로 GIS라외의 진행방향이외함의 원주방향 성분에 반응하는 센서에 대한 평가를 고려하는 경우는 적당한 방법이 아닐 수 있다. 이때는 실제 센서가 취부 되는 구조물을 모의하여 보정 시스템에 장착한 후 측정하여야 한다.

2.2 표준전자장의 발생과 보정방법

센서의 유효높이를 측정하기 위해서는 표준전자장  $E_r$ 을 발생 시켜야 한다. 표준 전자장을 발생하고 교정하는 방법은 크게 세 가지로 다음과 같으며, 일반적으로 센서의 크기와 종류, 주파수 범위 사용가능 장비의 종류와 정확도에 따라 그 방법을 결정한다[7].

- ① 자유공간 표준전자장법 (The free-space standard-field method)
- ② 도파관법 (Guided wave method)
- ③ 표준프로브 혹은 전달표준법 (The standard-probe or transfer-standard method)

자유공간 표준 전계법은 정확하게 보정된 송신 안테나 시스템을 사용하여 일정한 거리의 자유공간에 보정된 전계를 발생시키는 것으로, Friis 자유공간 전송 이론을 사용한다. 도파관 법은 직사각형 도파관, TEM cell, Wideband TEM cell, Gigahertz TEM cell, 코일 자체 생성장치 등을 이용하여 표준 전계를 발생시킨다. 발생된 전계는 발생장치의 구조를 바탕으로 계산한다.

표준 프로브법은 정확하게 보정된 안정적이고 신뢰성있는 프로브를 전달표준(transfer-standard)으로 삼는 것이

다. 표준 프로브는 안테나, TEM cell 등의 임의의 RF 전계 생성 장치에 의해 발생된 특정한 공간(혹은 도파관 시스템 내부)의 전계 크기를 측정하는데 사용된다. 보정되지 않은 센서를 표준 프로브가 설치된 같은 위치에 설치하고, 보정되지 않은 센서의 출력 값을 읽어서 표준 프로브의 획득된 데이터와 그 값을 비교한다.

본 논문에서는 평행판 TEM Line에서 발생한 전계를 표준 프로브법으로 보정하였다.

### 2.3. TEM Line의 설계 및 제작

UHF 부분방전센서의 유효높이 측정을 위한 표준 전자장 발생 장치로 비교적 구조가 간단한 평행판 전송선로 구조의 TEM Line을 선정하고 그림 1와 같이 설계 및 제작하였다. 상판 및 하판은 3mm 두께의 알루미늄 판으로 제작되었으며, 1.2 x 2.35m의 접지판에 베이클라이트(비유전율 4.60)막대로 상판을 지지하였다. 양쪽 테이퍼 부분은 SMA type의 50Ω 동축컨넥터로 종단되어져 있다. 상판의 넓이를 포함한 전체 구조는, 테이퍼 부분에서 중앙의 균일한 부분까지 전 선로구간에 걸쳐 특성임피던스 50Ω을 유지하도록 제작되었다. 중앙의 균일한 평행판 구간에서, 두 평판에 수직인 방향으로 입력 전력의 제공 근에 비례하는 균일한 전계가 발생되어 센서의 교정에 이용할 수 있다.

TEM Line의 제작에 앞서, 전자기장 시뮬레이션을 통하여 TEM Line의 동작 특성을 예상하였다. 그림 2는 TEM Line의 균일한 평행판 부분에서 살펴본, 900MHz 성분의 전계의 방향과 크기이다. 중앙부분에서 전계의 방향이 대부분 평행판에 수직인 방향임을 알 수 있고, 평행판에 수직인 전계 성분의 크기 또한 중앙에 고르게 분포해 있음을 알 수 있다.

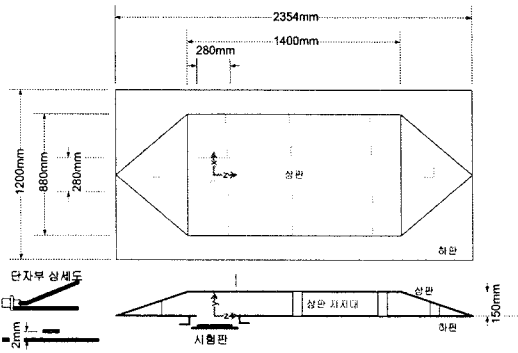


그림 1. TEM Line 설계도

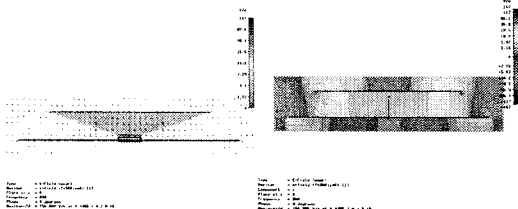


그림 2. TEM Line 내부 전계벡터 분포 (x-y평면, z=0, 900MHz, Magnitude of E)

그림 3은 계산된 TEM Line의 양쪽단에서의 반사 및 전달 전력 특성이다. 반사량이 대부분의 구간에서 -20dB이하로 매우 낮고, 상대 단자로 전달되는 전력은 -5dB~-15dB를 유지하다가 1.5GHz 이상에서는 그 이하로 낮아짐을 확인 할 수 있다. 전달전력이 낮은 것은 TEM Line의 방사 특성 때문이며, 내부전계가 정확히 계산될 경우 문제되지 않으나, 측정대상 센서의 크기가

클 때나, 측정 시 주위환경이 실험에 영향을 줄 수 있을 때는 주의해야 한다.

그림 6은, 회로망 분석기로 측정된, 단자에서의 반사 및 전달 특성이다. Agilent E8358A 회로망 분석기를 사용하여 0dBm의 전력원으로 측정되었다. 시뮬레이션 결과와 유사한 동작특성을 보이나, 단자부 제작이 이상적이지 못한 결과로 반사계수 값이 다소 높게 나타났다.

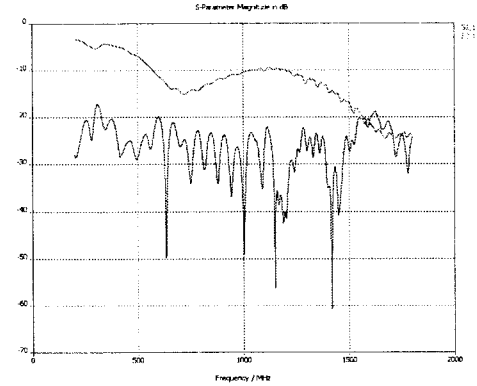


그림 3 시뮬레이션 된 반사 및 전달 특성 (s11, s21)

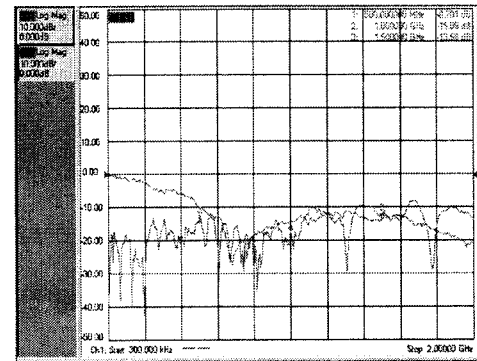


그림 4. 회로망 분석기로 측정된 반사 및 전달 특성 (s11, s21)

상기 TEM Line의 상판 및 하판 사이의 직육면체 공간 ( $-0.44 \leq x \leq 0.44, 0 \leq y \leq 0.15$ , 단위m)에서의 전자계 분포 특성은 상판의 넓이가 같은 평행판 전송선로와 동일하게 선로 폭에 독립적이며, 현재 구조에서의 TE 및 TM 모드의 차단 주파수는 1GHz이다.

### 2.4. TEM Line의 표준전계 보정 실험

그림 5은 TEM Line 내부전계를 보정하기 위한 실험의 장치도이다. RF 신호 발생기(HP8657B)를 사용하여, TEM Line내부에 전계를 유도하고, 특성을 알고 있는 표준프로브를 사용하여 그 출력을 읽는다. 표준 프로브는 직경 1.27mm, 높이 34.58mm의 모노폴을 사용하였다. 사용된 표준프로브의 주파수에 대한 유효높이는, HARRISON, C.W.의 문헌[3]을 통하여 계산되었고 그림 6에 나타나 있다

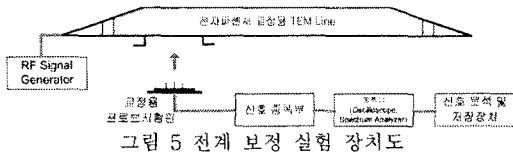


그림 5 전계 보정 실험 장치도

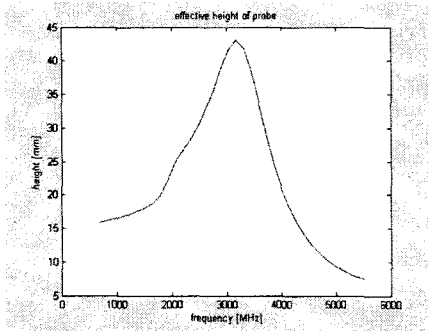


그림 6 표준프로브의 유효높이

그림 7는 신호발생기의 출력에 대한 표준프로브로 측정된 전력이며, 측정은 Advantest R313A 스펙트럼 분석기로 이루어졌다. TEM Line의 특성과 표준프로브의 특성이 포함된 결과로, 차단주파수 1GHz에서 출력이 낮아지는 것을 확인할 수 있다.

그림 8은 그림7의 출력 값과, 그림6의 유효높이를 근거로 보정된 TEM Line의 전계이다. 1.5GHz 이하 까지 균일한 특성을 보이고 있고, 신호 발생기 출력변화에 따른 전계크기 또한 선형적으로 증가하고 있다.

TEM Line의 전계 균일성 실험을 위해 그림 9과 같이 시험판의 5개의 위치에 프로브를 장착하여 실험을 실시하였다. 시험판은 280mm의 정방형이며, 그 중앙의 위치 1에 프로브를 장착 하였고, 중앙의 위치 1과 타 위치 사이의 간격은 100mm이다. 신호발생기의 출력이 0dBm일 때 결과가 그림 10에 나타나 있으며, 각 위치별로 중앙의 위치1의 결과와 전 주파수 구간에서 0.1 V/m이하의 오차를 보이고 있다. 1~1.7 GHz구간에서 위치 2, 1, 3 순서의 크기로 전계가 나타나는 것은 전력원에서 멀어지면서 TEM Line 외부로 전자파가 방사되기 때문으로 볼 수 있다. 위치 1과 위치 4, 5의 오차는 시험판 설치 시 TEM Line의 하판과 이상적인 접지면이 형성되지 않아 생긴 것으로 보인다.

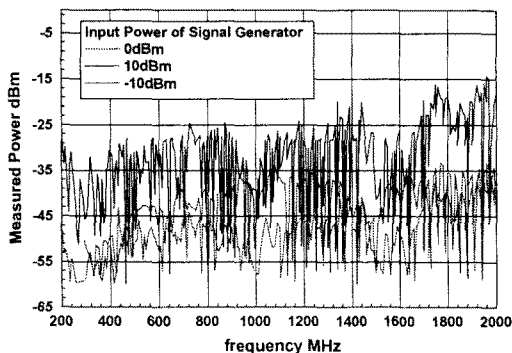


그림 7 신호발생기의 출력에 대한 표준프로브로 측정된 전력

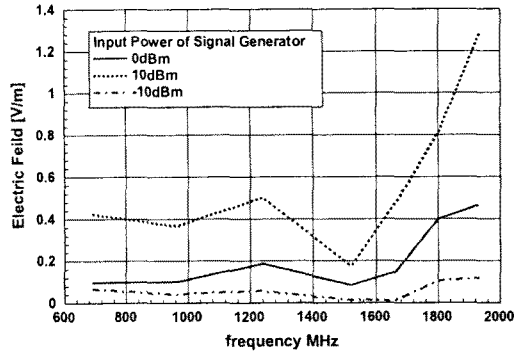


그림 8. 신호발생기 출력에 대한 TEM Line의 표준전계

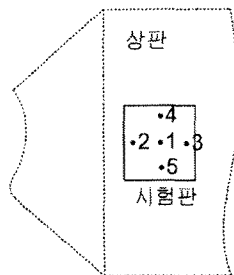


그림 9. 전계 균일성 실험을 위한 TEM Line 시험판의 프로브위치

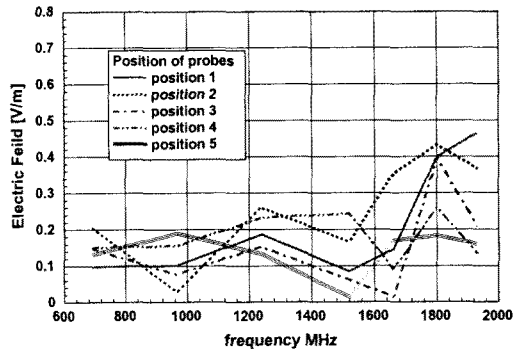


그림 10. 프로브의 측정 위치에 따른 전계

### 3. 결 론

대상 전력기기와 위치가 정해지지 않은 상태에서 UHF PD센서의 성능 측정시, 유효높이는 유용한 파라미터이며 이를 용이하게 측정하기 위해서 표준전계 발생장치가 필요하다.

표준전계를 발생하기 위해 평행판 전송선로 형태의 TEM Line을 설계 제작하였으며, 표준프로브법을 사용하여 전계를 보정하기 위해 여러 실험을 실시하였다.

제작된 TEM Line은 전자파의 진행 방향에 수직인 균일한 전계를 생성하며, 시뮬레이션 결과와 유사한 동작 특성을 보였다.

TEM Line의 전계 보정을 위해, 시험판에 설치한 표준프로브로 전력을 측정하였으며, 표준 프로브의 유효높이를 통하여 TEM Line의 표준 전계를 구했다. 표준 전계는 1.5GHz 이하까지 균일한 특성을 보이고 있고, 신호 발생기 출력변화에 따른 전계크기 또한 선형적으로 변화하였다. 시험판 중앙에서부터 상하 좌우 100mm 내부 범위의 표준전계는, 전 주파수 구간에서 0.1 V/m이하 오차

의 균일성을 나타내었다.

[참 고 문 헌]

- [1] A. Petit, "Field Experience of Partial Discharge Monitoring with the UHF Method", Proceedings of the 9th ISH(Gaz), Vol.5, pp.5596-1-5596-4, 1995
- [2] J.M.M.E. Silva, J. S. Pearson, B.F. Hampton and O. Farish, "PD Measurements in GIS using Portable Equipment", Proceedings of the 9th ISH, Vol.4, pp.4560-1-4560-4, 1995
- [3] J. S. Pearson, B. F. Hampton and A. G. Sellars, "A Continuous UHF Monitoring for Gas-insulated Substations", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 26, No. 3, p. 469-478, June 1991.
- [4] D. F. Binns, A. H. Mufti and N. H. Malik, "Optical Discharge Detection in SF<sub>6</sub>-insulated Systems", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 25, No. 2, pp. 405-414, April 1990.
- [5] KURRER, R., FESER, K., and KRAUB, T.: "Antenna theory of flat sensors for partial discharge detection at ultra-high frequencies in GIS", Proceedings of 9th ISH, Graz, 1995, Vol 5, pp.5625/1-5625/4
- [6] M D Judd, "Transient calibration of electric field sensors", IEE Proc., Science, Measurement and Technology, Vol. 146, No. 3, May 1999
- [7] "Electromagnetic fields with respect to human exposure, 100kHz-300GHz", IEE Std C95.3-2002
- [8] HARRISON, C.W., "The radiation effective half-length for cylindrical antennas less than 1.3 wavelengths long", IEEE Trans. Antennas Propag., 1963, AP-11,(6), pp. 657-660.