

이도훈*, 이현동, 신양섭, 이용희
 LG산전 전력연구소

Analysis of Partial Discharge Signal Propagation Characteristics in GIS Using FEM/EMTP

D.H Lee*, H.D.Lee, Y.S. Sin, Y.H. Lee
 LGIS ELECTROTECHNOLOGY R&D CENTER

Abstract - This paper was studied electromagnetic field distribution and damping of PD(Partial Discharge) signal in GIS(Gas Insulated Switchgear). Cut-off frequency of electromagnetic wave propagation modes were computed, electromagnetic field distribution of propagation modes in GIS by FEM(Finite Element Method) were simulated and simulated damping characteristic of electromagnetic waves in GIS by EMTP(Electromagnetic Transient Program) when generated PD pulse. Frequency band of TE_{mn}/TM_{mn} modes were determined by simulation results of electromagnetic field distribution and were discussed optimal position of UHF sensor from this results.

Equivalent circuit was used to simulate signal damping of PD pulse in GIS by EMTP and compared with measured results in laboratory of KERI.

1. 서 론

변전설비 용량의 급격한 증가에 따라 GIS (Gas-Insulated Switchgear)의 예방진단에 대한 필요성이 강조되고 있다. 특히 부분방전(Partial Discharge)이 발생하는 UHF(Ultra High Frequency) 신호를 측정하여 GIS의 상태를 감시하는 UHF 부분방전 검출기법은 부분방전량의 측정범위가 넓고, 전파의 잡음이 거의 없는 GIS 내부의 환경에 적합할 뿐만 아니라, 이상발생위치 및 결함원인의 추정이 용이하여 GIS 예방진단기법으로 각광받고 있다[1].

UHF 방법을 이용한 진단의 목적으로 더 큰 관심사는 고차 모드(high order mode)이다. 이 같은 파(wave)들은 중요한 특성을 갖고 있다. 즉, 모드의 차수들과 동축구조의 차원들에 의해 결정된 낮은 차단주파수(cut-off frequency, f_c)를 갖으며, 오직 f_c 보다 더 높은 주파수를 가진 전자파만이 GIS 내에서 전파할 수 있다. 일반적으로 UHF 센서에 의해 측정된 전자파는 고차모드인 TE, TM 모드이다[2].

본 논문에서는 GIS 구조에 의한 전자파의 전파모드(propagation modes)별 차단주파수를 산출하였으며, FEM(Finite Element Method) 프로그램을 이용하여 GIS 내 각 전파모드의 전자계분포를 시뮬레이션 하였다. 또한 GIS내에서 부분방전 발생 시 전자파 신호의 감쇠특성을 EMTP(ElectroMagnetic Transient Program)를 이용하여 시뮬레이션 하였다.

2. GIS내에서의 전자파 전파특성

GIS내에서 전자파는 관내벽에서 반사를 반복하면서 전파하기 때문에 독특한 전자파가 형성되는데 이때 GIS내의 전자계의 분포도를 모드(mode)라고하며, TEM, TE, TM 모드가 있다. 부분방전 펄스에 의해 여자인 UHF 전자파를 측정하는 것으로 가장 큰 관심사는 고차모드의 파(wave)이다. 이 같은 파는 모드의 차수와 동축 구조의 차원들에

의해 결정된 낮은 f_c 를 가지고 있다. 그래서 f_c 보다 낮은 주파수는 감쇠에 의해 GIS 모션을 통과하지 못하고 오직 f_c 보다 높은 주파수만이 GIS내를 통과할 수 있다[3].

2.1 동축선로내 전자파의 전파

GIS 모션에서의 전자파 전파특성은 동축 도파관에서의 전자파 전파특성으로 해석 되어질 수 있다. 전자계는 GIS 모션을 통해 정해진 형태를 띠고 전파한다. GIS 모션과 동축 도파관은 전송선로와 마찬가지로 전자기 에너지를 전송시키며 형태에 따라 각기 다른 주파수 및 전파모드로 전송한다.

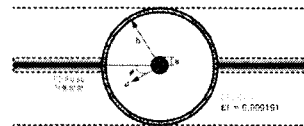


그림 1. 동축 GIS 전송선로
 Fig. 1. Coaxial GIS transmission line

GIS는 많은 특성임피던스의 불연속점을 가진 동축선로(Coaxial transmission line)로 보여 질수 있으며 그 구조는 그림 1과 같다[4].

2.2. GIS 구조에 따른 차단주파수 결정

GIS의 구조는 그림 1에서와 같이 내부도체가 있고, 외함으로 둘러싸인 동축 도파관 형태를 보이며, 부분방전 펄스 발생시 발생하는 고차모드의 파는 모드의 차수와 동축 구조의 차원들에 의해 결정된 낮은 f_c 를 가지고 있다. 그래서 f_c 보다 낮은 주파수는 감쇠에 의해 GIS 모션을 통과하지 못하고 오직 f_c 보다 높은 주파수만이 GIS내를 통과할 수 있다.

2.2.1. TE_{mn} 모드의 차단주파수

내부도체의 반지름 $a=120$ [mm], 외부도체의 반지름 $b=492.2$ [mm]인 362 [kV]급 GIS 동축 라인에서의 TE-모드는 식 (1)의 특성방정식을 만족시키는 차단파수(cutoff wave number, k_c)를 갖으며, J_n 은 1종 Bessel 함수, Y_n 은 2종 Bessel 함수를 나타낸다. (J_n 과 Y_n 은 J_n 과 Y_n 의 미분형)

$$J_n(k_c a) Y_n'(k_c b) - J_n'(k_c b) Y_n(k_c a) = 0 \quad (1)$$

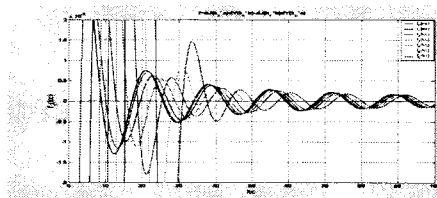


그림 2. TE_{mn} -모드의 차단파수(k_c)
 Fig. 2. Wave number(k_c) of TE_{mn} -mode

그림 2는 식 (1)의 k_c 에 대한 특성방정식을 산출한 값을 그래프로 나타낸 것이며, 산출된 k_c 값을 식(2)에 대입하여 계산한 f_c 를 표 1에 나타내었다.

$$f_{c, nm} = \frac{k_c}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (2)$$

표 1에 보면 가장 낮은 주파수는 320.41[MHz]이며, TE₁₁-모드가 TE-모드 중에서 부분방전 펄스의 주요감쇠모드가 된다는 것을 알 수 있다[5].

표 1. TE_{nm}-모드의 차단주파수 [MHz]
Table 1. Cutoff frequency [MHz] of TE_{nm}-modes

| n \ m | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0 | 856.9 | 1643.1 | 2439.5 | 3239.9 | 4042.3 | 4845.8 |
| 1 | 320.4 | 968.5 | 1697.8 | 2474.1 | 3265.2 | 4062.2 |
| 2 | 584.3 | 1235.8 | 1861.9 | 2579.0 | 3341.2 | 4121.8 |
| 3 | 813.4 | 1528.5 | 2120.9 | 2757.6 | 3469.7 | 4221.9 |

2.2.2. TM_{mn} 모드의 차단주파수

TE_{mn} 모드와 마찬가지로 TM_{mn} 모드에서도 식 (3)의 특성방정식을 만족시키는 차단파수 k_c 를 구하고, 이를 식 (2)에 대입하여 계산한 f_c 를 표 2에 나타내었다.

$$J_n(k_c a) Y_n(k_c b) - J_n(k_c b) Y_n(k_c a) = 0 \quad (3)$$

표 2. TM_{mn}-모드의 차단주파수 [MHz]
Table 2. Cutoff frequency [MHz] of TM_{mn}-modes

| n \ m | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0 | 788.3 | 1602.0 | 2411.6 | 3219.7 | 4027.2 | 4834.3 |
| 1 | 857.7 | 1644.5 | 2441.6 | 3242.8 | 4045.9 | 4850.0 |
| 2 | 1029.6 | 1765.5 | 2530.0 | 3311.5 | 4101.7 | 4896.9 |
| 3 | 1246.2 | 1946.7 | 2671.5 | 3423.9 | 4193.9 | 4974.8 |

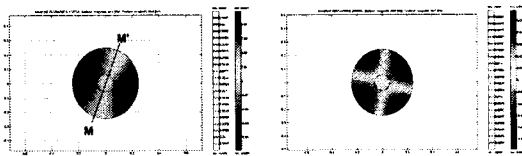
2.3. GIS내 전자계분포 해석

TE_{mn} 모드에 있어서, 첫 번째 첨자 m은 도파관 원형 단면에서 중심각이 2π [rad] 회전하는 동안에 자계분포가 몇 번 변화했는가를 의미하며, 두 번째 첨자 n은 중심에서 관벽까지의 반지름 상에서 자계분포가 몇 번 회전했는가를 의미한다.

2.3.1. GIS내 TE_{mn} 모드의 전자계분포 해석

그림 3은 GIS내를 전파하는 TE_{mn} 모드들의 전자계분포를 FEM 프로그램을 이용하여 시뮬레이션 한 것이다.

FEM 시뮬레이션 결과를 이용하여 TE 모드들의 각 차수에 대한 주파수 범위를 구할 수 있었다. 그림 3에 보인 것처럼 1[MHz]를 경계로 TE 모드들의 차수가 바뀌었다.

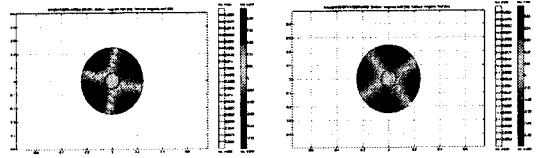


(a) TE₁₁ Mode(227~470 MHz) (b) TE₂₁ Mode(471~708 MHz)

그림 3. 362[kV] GIS내 TE_{mn} 모드의 전파형태
Fig. 3. Propagation form of TE_{mn} modes in 362[kV] GIS

여기서 그림 4를 살펴보면 같은 모드, 같은 차수의 TE₂₁ 모드가 차단주파수 f_c 를 경계로 자계분포가 변화되는 것을 확인할 수 있다. TE₂₁ 모드는 약 45°, TE₃₁ 모드는 약 30°, TE₄₁ 모드는 22.5가 회전하였으며, 이는 90°를 차수

m으로 나눠준 각(angle)만큼 회전한 것이다.



(a) TE₂₁ Mode ($f_c=584$ MHz) (b) TE₂₁ Mode (585 MHz)

그림 4. 차단주파수 f_c 에서 자계분포 방향의 회전
Fig. 4. Rotation of magnetic field direction at cut-off frequency f_c

2.3.2 GIS내 센서의 취부위치

그림 5는 설치되어있는 센서의 위치와 TE_{mn} 모드별 자계분포를 나타낸 것이다. 일반적으로 설치된 센서의 위치는 지표면을 기준으로 90°의 위치에 설치되어 있으나 자계분포는 전자파의 전파모드에 따라 다르고, 또한 주파수에 따라 그 분포의 방향이 변화한다.

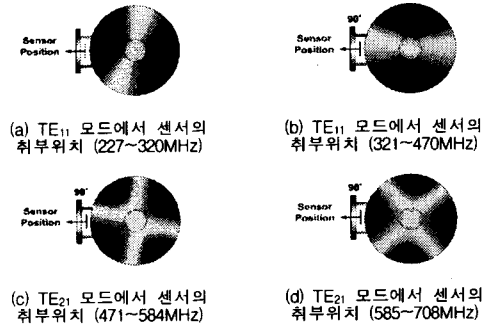


그림 5. 각 주파수 대역에서 자계분포와 센서의 위치
Fig. 5. Magnetic field distribution and sensor position at each frequency band

그림 5의 (a)(b)에서 TE₁₁ 모드 (227~320 MHz)의 자계분포가 센서의 취부위치인 90° 부분에서 그 세기가 강하고, TE₁₁ 모드의 차단주파수 이상의 주파수대역 (321~470 MHz)에서는 90° 부분에서 가장 약하다. 이를 GIS 모션에서 부분방전 신호의 감쇄율을 나타낸 그림 6과 비교해보면 TE₁₁ 모드의 차단주파수 이상의 영역에서 감쇄가 커짐을 설명할 수 있게 된다.

또한 TE₂₁ 모드에서는 차단주파수 이하의 영역 471~584[MHz]에서 감쇄율이 크고, 차단주파수 이상의 영역에서 감쇄율이 작아지는 현상도 그림 5의 자계의 분포와 센서의 위치를 비교해 봄으로써 설명 될 수 있다.

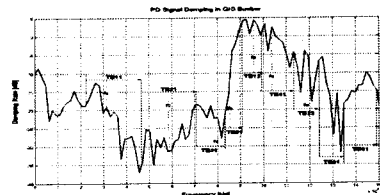


그림 6. GIS 모션에서 부분방전 신호의 감쇄
Fig. 6. Damping of PD signal in GIS busbar

이러한 현상들을 감안하여 특정 검출 주파수대역이나 센서의 특성 등을 고려하여 센서의 취부 위치를 선정해야 할 것이다.

2.4. GIS내 부분방전 펄스 감쇠현상 시뮬레이션

2.4.1 부분방전원(PD Source) 모델링

그림 7은 전기연구원에서 측정된 부분방전원 펄스와 이를 EMTP로 시뮬레이션 한 것이다. 부분방전원의 상승시간은 약 0.5[ns], 펄스폭은 약 6[ns], 전압의 크기는 1.914[V]이다.

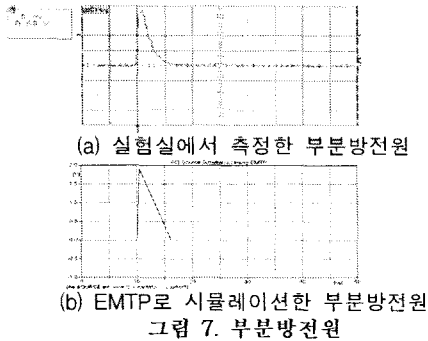


그림 7. 부분방전원

Fig. 7. Partial Discharge Source

2.4.2 GIS 모선 및 스페이스 모델링

표 3과 표 4는 SF₆ 가스의 유전율(ϵ_r)을 1.000191, 스페이스의 유전율(ϵ_r)을 6이라 가정하고, EMTP 라인·케이블 상수(LCC) 프로그램을 이용해 산출한 값이다.

표 3. EMTP 시뮬레이션을 위한 GIS 모선의 파라미터

Table 3. GIS busbar parameter for EMTP simulation

| Modal attenuation | Propagation velocity | Modal impedance | Characteristic Impedance |
|----------------------|----------------------|------------------------|--------------------------|
| 6.95580 E+00 [db/km] | 2.72529 E+08 [m/sec] | 1.232208 E-01 [ohms/m] | 7.693457 E+01 [ohm] |

2.4.3 스페이스에 의한 부분방전 감쇠 시뮬레이션

EMTP 분석을 수행하기 위해, 모든 영역을 특성임피던스와 전파속도에 의해 지정된 분포정수 라인으로 시뮬레이션 하였다.

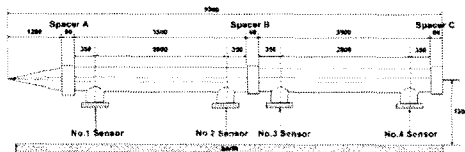


그림 8. 362[kV] GIS 실험모델

Fig. 8. 362[kV] GIS mock-up model

그림 8은 362[kV] GIS 실험 모델이다. GIS내 스페이스를 통과하는 부분방전 펄스의 감쇠율을 EMTP 시뮬레이션 하였으며, 이를 전기연구원에서 측정된 실험데이터와 비교하였다.

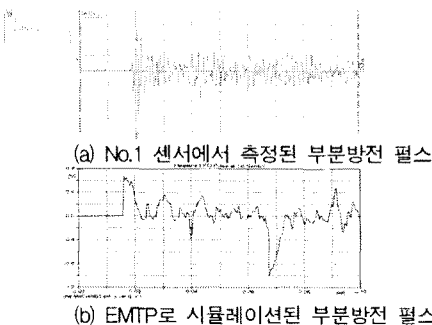


그림 9. 스페이스 A를 통과한 부분방전 펄스의 감쇠

Fig. 9. Damping rate of PD Pulse due to passage through Spacer A

그림 9는 부분방전 펄스가 GIS내 스페이스 A를 통과했을 때의 부분방전 펄스의 감쇠를 시뮬레이션 한 것이다. 실험실에서 측정된 부분방전 펄스의 최대전압은 0.56[V]로 부분방전원에서 70[%] 감쇠되었고, 시뮬레이션된 부분방전 펄스의 최대전압은 0.63[V]로 67[%]가 감소되었다.

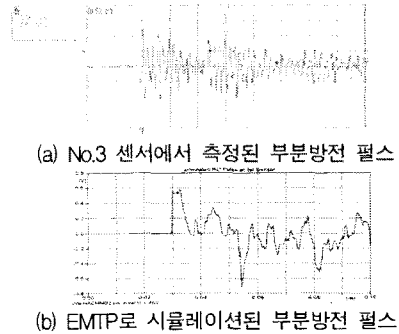


그림 10. 스페이스 B를 통과한 PD Pulse의 감쇠

Fig. 10. Damping rate of PD Pulse due to passage through Spacer B

그림 10은 부분방전 펄스가 GIS내 스페이스 B를 통과했을 때의 파형이다. 실험실에서 측정된 부분방전 펄스의 최대전압은 0.484[V]로 부분방전원에서 75[%] 감쇠되었고, 시뮬레이션된 부분방전 펄스의 최대전압크기는 0.54[V]로 72[%]가 감소되었다.

3. 결 론

본 논문에서는 362[kV] GIS 구조에 의한 전자파의 전파모드별 차단주파수를 산출하였으며, FEM 프로그램을 이용하여 GIS내 각 전파모드의 전자계분포를 시뮬레이션 하였다. 또한 GIS내에서 부분방전 발생 시 전자파 신호의 감쇄특성을 EMTP 프로그램을 이용하여 시뮬레이션 하였다.

GIS는 복잡한 내부와 밀폐된 구조로 되어있기 때문에 GIS내 부분방전 신호의 전파특성들이 아직 충분히 규명되지 않았다. 부분방전 신호의 전파특성에 대한 이해는 비용경쟁력을 갖는 최적 진단시스템을 위해 꼭 필요한 것이며, 센서의 지정 및 배치 결정, 부분방전원의 위치판단에 많은 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 구선근, "GIS용 UHF 부분방전검출장치의 감도 측정법", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, A권, 1558-1560, 2003
- [2] Jiansheng Wang etc., "Propagation Characteristics of UHF Electromagnetic Waves Induced by Partial Discharge in GIS", I EEE International Symposium on Electrical Insulation", April 2-5, 2000
- [3] M C Zhang etc., "TEM- and TE-Mode Waves Excited by Partial Discharge in GIS", High Voltage Engineering Symposium No.467, 1999, pp. 5.144.P5-5.147.P5
- [4] M C Zhang etc., "High Order Mode Waves Excited in GIS", High Voltage Engineering Symposium No.467, 1999, pp. 5.148.P5-5.151.P5
- [5] Jiansheng Wang etc., "Propagation Characteristics of UHF Electromagnetic Waves Induced by Partial Discharge in GIS", I EEE International Symposium on Electrical Insulation", April 2-5, 2000