

EMTP를 이용한 GIS내 부분방전 펄스의 감쇠특성 해석

(Analysis of Partial Discharge Pulse Damping Characteristics in GIS Using EMTP)

이도훈* · 김재철 · 송승엽 · 신중은 · 노광현 · 김광화

(Do-Hoon Lee* · Jae-Chul Kim · Seung-Youp Song · Jung-Eun Shin · Kwang-Hyun Noh · Kwang-Whoa Kim)

Abstract

The principle of the ultra-high frequency (UHF) method to detect partial discharge(PD) in GIS is to measure the UHF electromagnetic waves excited by PD pulses. Such electromagnetic waves propagate along the GIS busbar in the TEM-mode, TE-mode, TM-mode. And the coaxial busbar of the GIS acts as a waveguide in which the UHF electromagnetic waves travel.

This paper was studied the analysis on damping characteristic of electromagnetic waves excited by PD in GIS and presented the method to yield the cutoff frequency for determine the minimum band of sensor that detect the PD pulse.

1. 서론

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

UHF방법을 이용한 진단 목적으로 더 큰 관심사는 고차모드(High order mode)이다. 이 같은 파(Wave)들은 주요한 특성을 가지고 있다. 즉, 모드의 차수들과 동축(Coaxial) 구조의 차원들에 의해 결정된 낮은 차단주파수 f_c (Cutoff frequency)를 갖으며, 오직 f_c 보다 더 높은 주파수를 가진 전자파만이 GIS내에서 전파할 수 있다. 일반적으로 UHF 센서에 의해 측정된 전자파는 고차모드(TE mode, TM mode)이다.

PD 신호의 전파특성에 대한 이해는 비용성능을 갖는 최적 진단시스템을 위해 꼭 필요한 것이며, 센서의 지정 및 배치의 결정, 부분방전원(PD Source)의 위치판단에 대한 행운의 열쇠라 할 수 있다[2].

본 논문에서는 GIS 내에서의 전자파 전파특성을 이해하기 위해 GIS 구조에 따른 주요모드의 f_c 를 결정하였으며, GIS 각 구성요소들의 파라미터 값을 산출하였다. 그리고 GIS 구조와 구성요소에 의존하는 전자파 감쇠특성을 EMTP로 시뮬레이션하기 위하여 등가회로를 사용하였으며, 시뮬레이션 결과의 타당성을 위해 전기연구원의 실험실 실험결과와 비교하였다.

2. GIS내에서의 전자파 전파특성

부분방전 펄스에 의해 여자된 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 모선을 통과하지 못하고 오직 f_c 보다 높은 주파수만이 GIS내를 통과할 수 있다[3].

2.1. 동축선로내 전자파의 전파

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

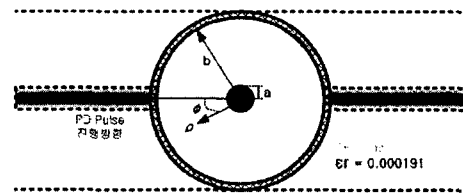


그림 1. 동축 GIS 전송선로

Fig. 1. Coaxial GIS transmission line

GIS내에서 전자파는 관 내벽에서 반사를 반복하면서 전파하기 때문에 독특한 전자파가 형성되는데 이때 GIS내의 전자계의 분포도를 모드(mode)라고 하며, TEM, TE, TM-모드가 있다[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.

내부도체의 반지름 $a=120$ [mm], 외부도체의 반지름 $b=492.2$ [mm]인 362 kV급 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)

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

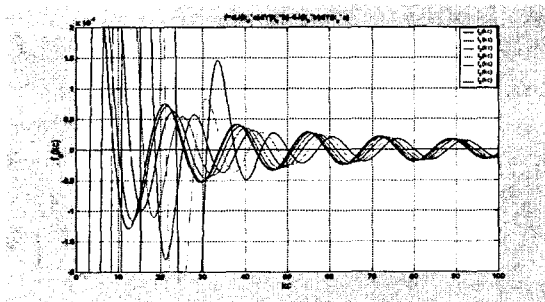


그림 2. TE_{nm}-모드의 차단파수(k_c)
Fig. 2. Wave number(k_c) of TE_{nm}-mode

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

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

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

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

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

2.3. GIS내 부분방전 펄스의 감쇠현상

GIS의 가장 일반적인 구성요소인 스페이서를 통과할 때 부분방전 펄스의 감쇠율은 주파수 의존성을 보인다. 그림 3에서와 같이 주파수가 높아짐에 따라 스페이서에 의한 부분방전 펄스의 감쇠율도 함께 증가한다[5].

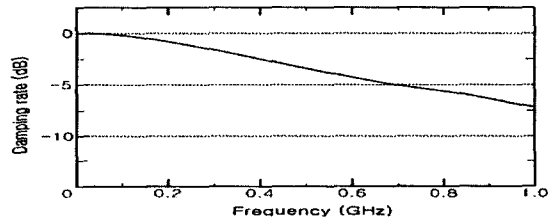
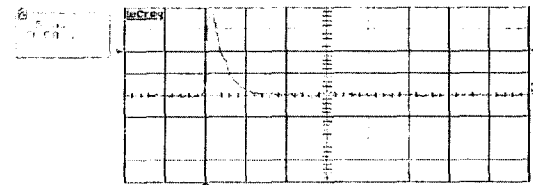


그림 3. 스페이서를 통과하는 PD 신호의 감쇠율
Fig. 3. Damping rate of PD Pulse due to passage through cone-type spacer

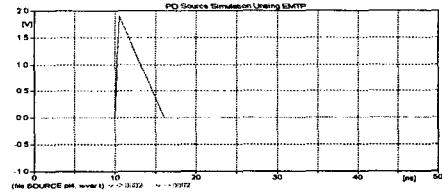
2.4. GIS내 부분방전 펄스 감쇠현상 시뮬레이션

2.4.1 부분방전원 (PD Source) 모델링

그림 4은 전기연구원에서 측정한 부분방전원 펄스와 이를 EMTP로 시뮬레이션 한 것이다. 부분방전원의 상승시간은 약 0.5[ns], 펄스폭은 약 6[ns], 전압의 크기는 1.914[V]이다.



(a) 실험실에서 측정한 부분방전원



(b) EMTP로 시뮬레이션한 부분방전원

그림 4. 전기연구원에서 측정한 부분방전원과 EMTP 시뮬레이션한 부분방전원

Fig. 4. Measured PD Source in KERI and Simulated PD Source Using EMTP

2.4.2 GIS 모션 및 스페이서 모델링

표 2와 표 3는 SF₆ 가스의 유전율 ϵ_r 을 1.000191, 스페이서의 유전율 ϵ_r 을 6이라 가정하고, EMTP 라인·케이블 상수(LCC) 프로그램을 이용해 산출한 값이다.

표 2. EMTP 시뮬레이션을 위한 GIS 모션의 파라미터
Table 2. 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]

표 3. EMTP 시뮬레이션을 위한 스페이서의 파라미터
Table 3. Spacer parameter for EMTP simulation

Modal attenuation	Propagation velocity	Modal impedance	Characteristic Impedance
1.54890 E+01 [db/km]	1.22387 E+08 [m/sec]	1.232208 E-01 [ohms/m]	3.454973 E+01 [ohm]

2.4.3 스페이스에 의한 부분방전 펄스의 감쇠 시뮬레이션

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

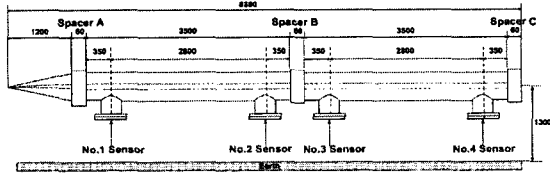
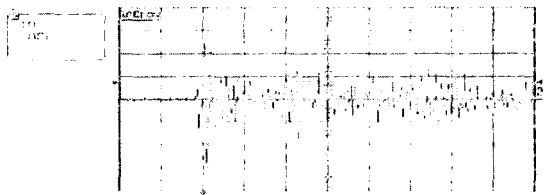
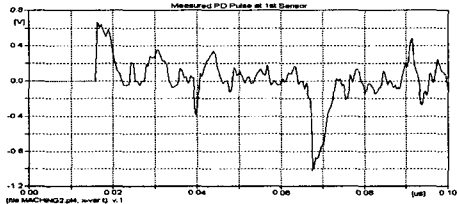


그림 5. 전기연구원의 362[kV] GIS 실험모델
Fig. 5. 362[kV] GIS mock-up model in KERI

그림 5은 전기연구원의 362[kV] GIS 실험 모델이다. GIS내 스페이스를 통과하는 부분방전 펄스의 감쇠율을 EMTP 시뮬레이션 하였으며, 이를 전기연구원에서 측정된 실험데이터와 비교하였다.



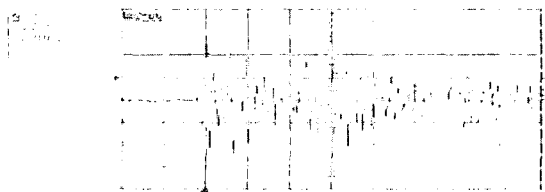
(a) No.1 센서에서 측정된 부분방전 펄스



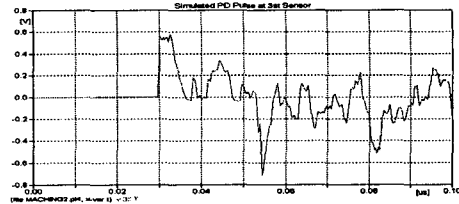
(b) EMTP로 시뮬레이션된 부분방전 펄스

그림 6. 스페이스 A를 통과한 부분방전 펄스의 감쇠
Fig. 6. Damping rate of PD Pulse due to passage through Spacer A

그림 6는 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.



(a) No.3 센서에서 측정된 부분방전 펄스



(b) EMTP로 시뮬레이션된 부분방전 펄스

그림 7. 스페이스 B를 통과한 PD Pulse의 감쇠
Fig. 7. Damping rate of PD Pulse due to passage through Spacer B

그림 7은 부분방전 펄스가 GIS내 스페이스 B를 통과했을 때의 파형이다. 실험실에서 측정된 부분방전 펄스의 최대전압은 0.484[V]로 부분방전원에서 75[%] 감쇠되었고, 시뮬레이션된 부분방전 펄스의 최대전압 크기는 0.54[V]로 72[%]가 감소되었다.

3. 결론

본 논문에서는 GIS 구조에 의한 전자파의 전파모드별 차단주파수와 EMTP 시뮬레이션을 위한 GIS 구성요소의 파라미터 값을 산출하였다. GIS에서 가장 낮은 차단주파수를 갖는 고차모드는 TE₁₁-모드이며, 부분방전 펄스의 주요 감쇠모드가 됨을 밝혔다.

GIS의 구성요소에 의존하는 전자파의 감쇠특성을 EMTP로 시뮬레이션하기 위하여 등가회로를 사용하였으며, 시뮬레이션 결과의 타당성을 위해 전기연구원의 실험실 결과와 비교하였다. 입력된 부분방전 펄스와 각 센서에서 검출된 최대전압을 비교한 결과 부분방전 펄스가 1개의 스페이스를 통과했을 때의 감쇠율은 70[%]였으며, 시뮬레이션 결과는 67[%]였다. 2개의 스페이스를 통과했을 때의 실측 감쇠율은 75[%], 시뮬레이션 결과는 72[%]로 1개의 스페이스를 통과했을 때보다 감쇠율이 조금 더 증가되었다.

감사의 글

본 논문은 한국전기연구원의 연구비 지원으로 진행 되었습니다.

[참고 문헌]

- [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", IEEE 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", IEEE International Symposium on Electrical Insulation", April 2-5, 2000