

FEM을 이용한 GIS내 부분방전 신호의 전파특성 해석

이도훈·이현동, 이용희, 박기훈, 류강열, 신양섭
LG산전 전력연구소

Analysis of Partial Discharge Signal Propagation Characteristics in GIS Using FEM

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

Abstract - The UHF electromagnetic waves excited by PD pulses propagate along the GIS busbar not only TEM mode, but also TE and TM mode. Generally the waves detected by the UHF sensors are those of high order modes and such waves can only propagate the higher than cut-off frequency. In this paper, computed cut-off frequency of 362[kV] GIS by each modes and simulated electromagnetic field of each propagation modes by FEM(Finite Element Method) program. Frequency band of each TEM_m/TM_m modes were determined by simulation results and were discussed optimal position of UHF sensor from this results.

대해 논하였다.

2. GIS내에서의 전자파 전파특성

GIS 모선에서의 전자파 전파특성은 동축 도파관에서 전자파 전파특성으로 해석 되어질 수 있다. 전자계는 GIS 모선을 통해 정해진 형태를 띠고 전파한다. GIS 모선과 동축 도파관은 전송선로와 마찬가지로 전자기 에너지를 전송시키며 형태에 따라 각기 다른 주파수 및 전파모드로 전송한다.

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

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].

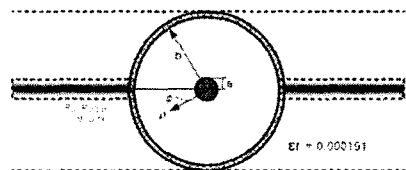


그림 1. 동축 GIS 전송선로

Fig. 1. Coaxial GIS transmission line

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 감쇄에 의해 GIS 모선을 통과하지 못하고 오직 f_c 보다 높은 주파수만이 GIS내를 통과할 수

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 감쇠가 거의 없는 GIS 내부의 환경에 적합할 뿐만 아니라, 이상발생위치 및 결합원인의 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. 이러한 부분방전 신호의 전파특성에 대한 이해는 비용경쟁력을 갖는 최적 진단시스템을 위해 꼭 필요한 것이며, 센서의 선택 및 위치결정에 대한 행운의 열쇠라 할 수 있다[2].

본 논문에서는 GIS 구조에 의한 전자파의 전파모드(propagation mode)에 따른 차단주파수를 산출하였으며, FEM(Finite Element Method) 프로그램을 이용하여 GIS 내 각 전파모드의 전자계(electromagnetic field) 분포를 시뮬레이션하여 각 전파모드에 따른 전자계분포와 센서의 취부위치의 관계에 따른 부분방전 신호의 감쇄현상에

있다.

2.2.1. TE_{mn} 모드의 차단주파수

내부도체의 반지름 $a=120[\text{mm}]$, 외부도체의 반지름 $b=492.2[\text{mm}]$ 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)

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

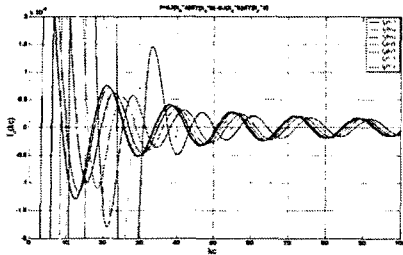


그림 2. TE_{mn}-모드의 차단파수(k_c)

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.

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

3. GIS내 전자계분포 해석

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

자계가 원통인 경우에는 그들이 모두 직교하는 평면은 존재하지 않는다. 또 자계가 방사선상(放射線狀)일 때에는 관벽이 직교면이 되지만 이것은 평면이 아니다. 따라서 최초의 첨자는 모두 "0"이다. 자계가 "0"이 되는 원통면은 적어도 한 개 존재한다. 그림 3의 (d)는 진행방향에 자계가 존재하므로 TE₀₁파이고, (a)는 TE₁₁파로 M-M'와 관축을 통하는 평면만이 자계와 직교하고 관벽만이 자계 "0"의 원통면이 되므로 차수(order) mn은 "11"이 된다.

3.1. GIS내 TE_{mn}/TM_{mn} 모드의 전자계분포 해석

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

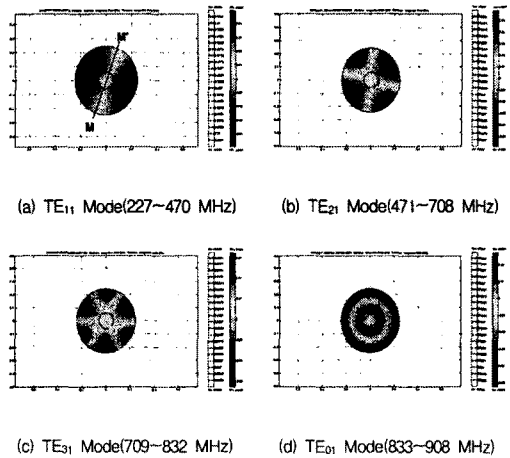


그림 3. 362[kV] GIS내 TE_{mn} 모드의 전파형태

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

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.

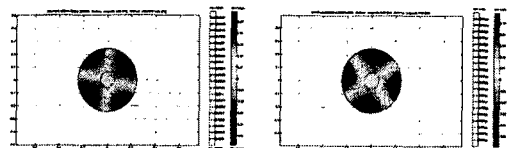


그림 4. 차단주파수 f_c 에서 자계분포 방향의 회전

Fig. 4. Rotation of magnetic field direction at cut-off frequency f_c

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 22.5°가 회전하였으며, 이는 90°를 차수 m으로 나뉜 각(angle)만큼 회전한 것이다.

TE_{mn} 모드와 마찬가지로 TM_{mn} 모드도 1[MHz]를 사이로 TM_{mn} 모드의 차수가 바뀌었으며, 같은 모드 같은 차수의 TM파가 정확히 차단주파수 f_c 를 경계로 자계분포의 방향이 변화했다.

3.2 GIS내 센서의 취부위치

PD의 검출효율을 높이고, 외부노이즈의 영향을 최소화 하기위해 내장형 센서의 사용을 권고하고 있으며, 이러한 내장형 센서를 취부하기 위해서는 GIS 설계시부터 센서의 취부위치를 고려해줘야 한다.

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

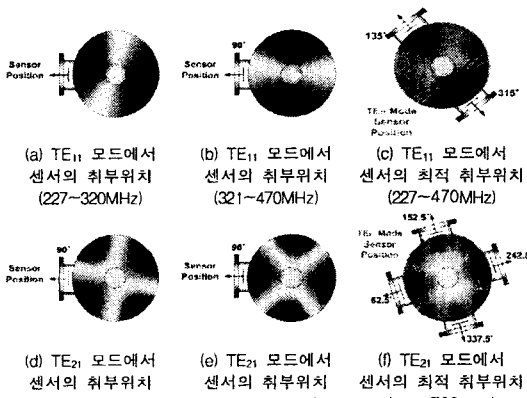


그림 5. 각 주파수 대역에서 자계분포와 센서의 위치

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 모선에서 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 봄으로서 설명 될 수 있다. 이러한 현상은 센서와 앰프(Amp)의 특성을 보이는 약 850[MHz]~1300[MHz] 영역을 제외한 모든 영역에서 유효했다.

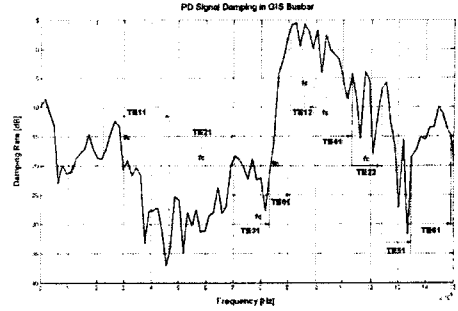


그림 6. GIS 모선에서 부분방전 신호의 감쇄
Fig. 6. Damping of PD signal in GIS busbar

이는 모드의 차단주파수 이상의 주파수에서는 모드가 전파할 수 없으며, 이로 인해 차단주파수에서 신호의 감쇄현상이 일어난다는 기존의 주장과는 달리 그림 4에서 밝힌 각 모드의 차단주파수에서 자계분포의 방향이 변함으로 인한 것이라 생각된다.

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

3. 결 론

본 논문에서는 362[kV] GIS 구조에 의한 전자파의 전파모드별 차단주파수를 산출하였으며, 362[kV] GIS내에서 TE_{mn}파의 전자계분포 시뮬레이션을 토대로 센서의 취부위치와 PD 신호 감쇄율과의 관계를 밝혔다.

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] 김광화, 선중호, 최재구, "GIS 예방진단을 위한 센서적용 및 운영실태조사", 한국전력공사, 1999, pp.1
- [2] 권동진, 윤진열, "변전설비 진단기술 개발 연구", 전력연구원, 1998, pp. 3 4
- [3] 이도훈, 김재철, 송승엽, 신중은, 김광화, "GIS내에서 PD Pulse 전파특성에 관한 연구", 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, pp. 241-243, 2003.05
- [4] 이도훈, 김재철, 송승엽, 신중은, 김광화, "EMTP를 이용한 GIS내 부분방전 펄스의 감쇄특성 해석", 한국조명전기설비학회 춘계학술대회 논문집, pp. 103-105, 2003.11
- [5] 김규환, 안태나, 전파공학, 技多利, 2000, pp. 64-76
- [6] David M. Pozar, Microwave engineering, John Wiley & Sons Inc, 1990, pp. 104-144
- [7] FEMLAB Rule Book, Electromagnetics Module
- [8] M C Zhang, "TEM and TE mode waves excited by partial discharge in GIS", High voltage engineering symposium No.467, 1999, pp. 5.144pP5-5.147pP5