

Analysis of Partial Discharge Signal Propagation Characteristics in GIS using FEM

金載哲[†] · 李都勳^{*} · 宋承燁^{**} · 金光和^{***}
 (Jae-Chul Kim · Do-Hoon Lee · Seung-Yeop Song · Kwang-Whoa Kim)

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 higher than cut-off frequency. In this paper, the cut-off frequency of 362[kV] GIS for each modes is computed and the electromagnetic field of each propagation modes is simulated by FEM(Finite Element Method) program. Frequency band of each TEM_n/TM_m modes was determined by simulation results and was discussed optimal position of UHF sensor from this results.

Key Words : GIS, Partial Discharge, Propagation Mode, FEM

1. 서 론

변전설비의 규모가 커지고 환경 및 부지문제에 의해 GIS(Gas-Insulated Switchgear) 설비가 급격히 증가하고 있으며, GIS 설비의 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 진단목적으로 더 큰 관심사는 고차 모드(high order mode)이며, 이 같은 파(wave)들은 중요한 특성을 갖고 있다. 즉, GIS내의 부분방전의 전파 특성은 전파 모드의 차수들과 동축 구조의 차원들에 의해 결정된 낮은 차단주파수(cut-off frequency, f_c)를 갖고며, 오직 f_c 보다 더 높은 주파수를 가진 전자파만이 GIS 내에서 전파할 수 있다. 일반적으로 UHF 센서에 의해 측정된 전자파는 고차 모드인 TE, TM 모드이다. 이러한 부분방전 신호의 전파특성에 대한 이해는 비용경쟁력을 갖는 최적 진단시스템을 위해 꼭 필요한 것이며, 센서의 선택 및 위치결정에 대해 많은 기여를 할 수 있을 것이라 생각된다[2].

2. GIS내에서의 전자파 전파특성

GIS는 동축선로(coaxial transmission line)로 보여질 수 있으며, GIS내에서 전자파는 관 내벽에서 반사를 반복하면서 전파하기 때문에 독특한 전자파가 형성되는데 이 때 GIS 내의 전자계의 분포도를 모드(mode)라고 하며, TEM, TE, TM 모드가 있다[3,4].

2.1 TEM파

TEM파(Transverse ElectroMagnetic Waves)는 전자계 E, H가 전송방향(+Z방향)에 대해 수직성분을 갖는 전자파로써 $E_z=H_z=0$ 인 평면파 형식으로 횡전자파(TEM wave)를 말하며, 중심도체가 없는 속이 빈 도체관 안에는 존재할 수 없으므로 GIS에서는 전파할 수 있다[5,6].

그림 1은 GIS 모선의 동축선로 구조를 나타낸다.

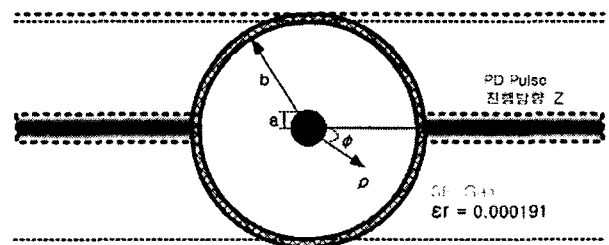


그림 1 GIS 모선의 동축선로의 구조
 Fig. 1 Configuration of coaxial line in the GIS busbar

전위 함수 $\Phi(\rho, \phi)$ 는 다음의 라플라스 방정식을 만족한다.

[†] 교신저자, 正會員 : 崇實大 工大 電氣制御시스템工學部 教授 · 工博
 E-mail : jckim@ssu.ac.kr

* 正會員 : LG産電 電力研究所 研究員

** 學生會員 : 崇實大 工大 電氣制御시스템工學部 碩士

*** 正會員 : 韓國電氣研究員 電力設備 診斷研究그룹長

接受日字 : 2004年 5月 5日

最終完了 : 2004年 9月 21日

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial \Phi(\rho, \phi)}{\partial \rho} \right) + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 \Phi(\rho, \phi)}{\partial \phi^2} = 0 \quad (1)$$

식 (1)의 경계조건에 따라

$$\Phi(a, \phi) = V_0, \quad \Phi(b, \phi) = 0 \quad (2)$$

Z축 방향으로 전파되는 TEM-mode의 전자기계는 다음과 같다.

GIS 내부의 횡축전계:

$$E(\rho, \phi, z) = \frac{V_0 \hat{\rho}}{\rho \ln b/a} e^{-j\beta z} \quad (3)$$

GIS 내부의 횡축자계:

$$H(\rho, \phi, z) = \frac{V_0 \hat{\phi}}{\eta \rho \ln b/a} e^{-j\beta z} \quad (4)$$

- V_0 : 신호 크기
- $\beta = \omega \sqrt{\mu \epsilon}$: 파의 전파상수
- $\eta = \sqrt{\mu \epsilon}$: 파의 임피던스
- ϵ, μ : GIS에서 SF₆가스의 유전율과 투자율

2.2 TE파와 TM파

TE파(Transverse Electric Waves)는 그림 2에서 전파의 진행방향(Z방향)에 자계성분만 있고, 전계성분은 직각방향(횡방향)에 있는 모드를 횡전파(橫電波)라고 하며 H 파라고도 한다. TM파(Transverse Magnetic Waves)는 TE파와 반대로 진행방향(Z방향)에 전계성분만 있고, 자계성분은 직각방향(횡방향)에 있는 모드를 말하며, 횡자파(橫磁波) 또는 E 파라 한다[6,7].

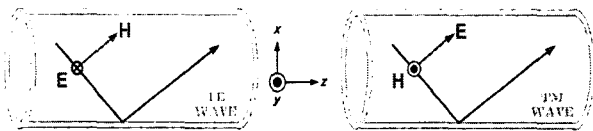


그림 2 TE/TM파의 전파형태
Fig. 2 Propagation mode of TE/TM waves

TE 모드는 $E_z = 0$ 이며, H_z 는 식 (5)을 만족한다.

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} + k_c^2 \right) h_z(\rho, \phi) = 0 \quad (5)$$

여기서, $H_z(\rho, \phi, z) = h_z(\rho, \phi) e^{-j\beta z}$, $k_c = k^2 - \beta^2$ 이다.
식 (5)의 일반해는 식 (6)과 같이 되며, E_ϕ 를 구하면 식 (7)이 된다.

$$h_z(\rho, \phi) = (A \sin n\phi + B \cos n\phi) (C J'_n(k_c \rho) + D Y'_n(k_c \rho)) \quad (6)$$

$$E_\phi(\rho, \phi) = \frac{j\omega \mu}{k_c} (A \sin n\phi + B \cos n\phi) \cdot (C J'_n(k_c \rho) + D Y'_n(k_c \rho)) e^{-j\beta z} \quad (7)$$

여기서, $J_n(x)$ 는 1종 Bessel 함수, $Y_n(x)$ 는 2종 Bessel 함수를 나타내며, 동축선로의 내부도체는 임의의 유한한 반지름을 가지고 있으므로, $\rho=0$ 인 점은 전자계 해석에서 배제되어야 하므로 $D \neq 0$ 이다.

동축선로상의 경계조건은 식 (8)이다.

$$E_\phi(\rho, \phi) = 0 \quad (\rho = a \text{ 와 } b \text{ 에서}) \quad (8)$$

식 (8)의 경계조건을 대입하면

$$\begin{aligned} C J'_n(k_c a) + D Y'_n(k_c a) &= 0 \\ C J'_n(k_c b) + D Y'_n(k_c b) &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

k_c 에 대한 특성(eigenvalue) 방정식으로 변환하면

$$J'_n(k_c a) Y'_n(k_c b) - J'_n(k_c b) Y'_n(k_c a) = 0 \quad (10)$$

식 (10)의 방정식을 만족하는 k_c 의 값은 동축선로의 TE_{mn} 모드의 차단파수(cut-off wave number)이다.

TM 모드는 TE 모드와 마찬가지로 구할 수 있으며, TM 모드에서 k_c 에 대한 특성 방정식은 식 (11)과 같다.

$$J_n(k_c a) Y_n(k_c b) - J_n(k_c b) Y_n(k_c a) = 0 \quad (11)$$

식 (11)의 방정식을 만족하는 k_c 의 값은 동축선로의 TM_{mn} 모드들의 차단파수이다.

TE, TM-mode의 차단 파수를 이용하여 GIS의 차단주파수를 구하게 된다.

3. GIS 구조에 의한 차단주파수

GIS는 각 해당 모드에 대하여 일정한 차단주파수를 갖는다. 인가된 신호의 주파수가 주어진 모드에서 차단주파수보다 높으면 전파에너지는 감쇄 없이 그 모드로 관내를 전파할 수 있으나, 차단주파수보다 낮으면 감쇄가 일어나 짧은 거리에서는 무시할 정도의 값으로 된다.

GIS내를 전송할 수 있는 파장은 모드에 따라 다르며, 각 모드마다 대응하는 하나의 차단파장(cut-off wave length)이 존재한다. 즉 주어진 관내의 여러 모드에서 차단파장이 가장 긴 모드(가장 낮은 차단주파수를 갖는 모드)를 기본모드(dominant mode)라 하며, 그 밖의 모드는 고차모드(higher order mode)라고 한다[8]. 또한 반파(半波)의 수를 l, m, n 으로 나타내는데 일반적으로 l 은 전파의 진행방향만 나타내기 때문에 수로 셀 수 없고 m, n 만을 이용해서 TE_{mn}, TM_{mn} 형식으로 표기한다[9,10,11].

3.1 TE_{mn} 모드의 차단주파수

그림 1에서 내부컨덕터의 반지름이 $a=60$ [mm], 외부 컨덕터의 반지름이 $b=246$ [mm]일 때의 차단 k_c 와 차단주파수 f_c 를

구해보면, 먼저 TE_{mn} 모드는 식 (10)의 특성방정식을 만족시키는 차단파수 k_c 를 구하기 위해 Matlab 프로그램을 사용하여 표 1의 차단 파수 k_c 를 구하였다.

표 1 TE_{mn} 모드들의 차단파수 k_c

Table 1 Cut-off wave number k_c of TE_{mn} modes

m \ n	1	2	3	4	5
0	17.95	34.42	51.11	67.88	84.69
1	6.71	20.29	35.57	51.84	68.41
2	12.24	25.89	39.01	54.03	70.00
3	17.04	32.02	44.43	57.78	72.70
4	21.60	35.57	50.64	63.03	76.57
5	26.06	42.71	56.52	69.17	81.68

표 2는 표 1에서의 차단파수의 값을 식 (12)에 대입하여 산출한 TE_{mn} 모드들의 차단주파수 f_c 이다.

$$f_{c, mn} = \frac{k_c}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (12)$$

표 2 TE_{mn} 모드들의 차단주파수 f_c

Table 2 Cut-off frequency f_c of TE_{mn} modes [MHz]

m \ n	1	2	3	4	5
0	856.94	1643.12	2439.52	3239.99	4042.38
1	320.40	962.50	1697.80	2474.14	3265.21
2	584.35	1231.83	1861.98	2579.06	3341.24
3	813.45	1528.53	2120.90	2757.65	3469.71
4	1031.04	1697.73	2417.19	3008.36	3654.56
5	1244.15	2038.56	2697.62	3301.28	3898.33

표 2에서 가장 낮은 주파수는 320[MHz]이며, TE₁₁ 모드가 TE_{mn} 모드들 중 신호감쇄의 기본모드가 된다는 것을 알 수 있다.

3.2 TM_{mn} 모드들의 차단주파수

TE_{mn} 모드와 마찬가지로 TM_{mn} 모드들의 차단주파수 f_c 를 표 3에 나타내었다.

가장 낮은 주파수는 788[MHz]이며, TM₀₁ 모드가 TM_{mn} 모드들 중 신호감쇄의 기본 모드가 된다는 것을 알 수 있다.

표 3 TM_{mn} 모드들의 차단주파수 f_c

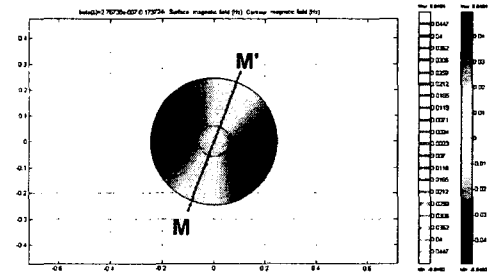
Table 3 Cut-off frequency f_c of TM_{mn} modes [MHz]

m \ n	1	2	3	4	5
0	788.26	1602.02	2411.58	3219.71	4027.17
1	857.68	1644.51	2441.61	3242.82	4045.88
2	1029.60	1765.44	2530.03	3311.47	4101.74
3	1246.16	1946.67	2671.54	3423.86	4193.93
4	1474.31	2164.85	2857.11	3576.72	4321.12
5	1702.62	2399.55	3074.19	3764.83	4481.29

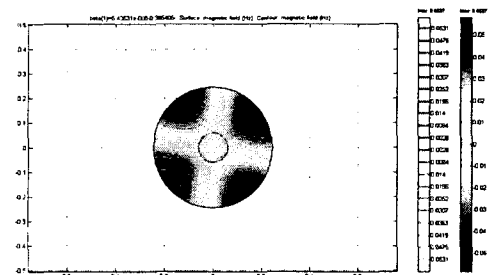
4. GIS내 전자계분포 해석 및 센서의 취부위치

4.1 GIS내 TE_{mn} 모드의 전자계분포 해석

TE_{mn} 모드에 있어서, 첫 번째 첨자 m은 GIS 모선의 원형 단면에서 중심각이 2π [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 않고, 또한 자계가 방사선상(放射線狀)일 때에는 관벽이 직교면이 되지만 이것은 평면이 아니다. 따라서 최초의 첨자는 모두 "0"이 되고, 자계가 "0"이 되는 원통면은 적어도 한개 존재한다.



(a) TE₁₁ Mode(227~470 MHz)



(b) TE₂₁ Mode(471~708 MHz)

그림 3 362[kV] GIS내 TE_{mn} 모드의 전파형태

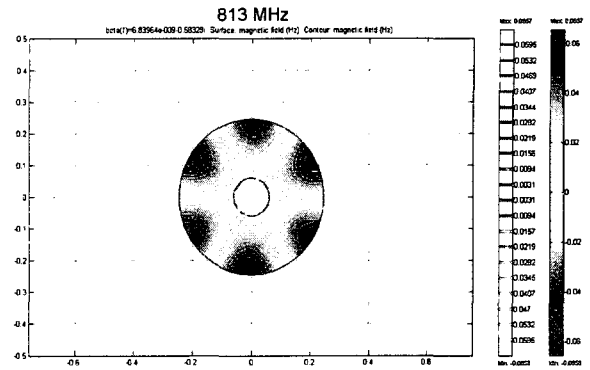
Fig. 3 Propagation form of TE_{mn} modes in 362[kV] GIS

그림 3은 GIS내를 전파하는 TE_{mn} 모드들의 전자계분포를 FEM 프로그램을 이용하여 시뮬레이션 한 것이다[12]. 그림 3의 (a)는 TE₁₁파로 M-M'와 관측을 통하는 평면만이 자계와 직교하고 관벽만이 자계 "0"의 원통면이 되므로 차수(order) mn은 "11"이 된다. 시뮬레이션 결과를 이용하여 TE_{mn} 모드들의 각 차수에 대한 주파수 범위를 1[MHz]를 사이로 정확히 구할 수 있었으며, 그 결과를 표 4에 나타내었다.

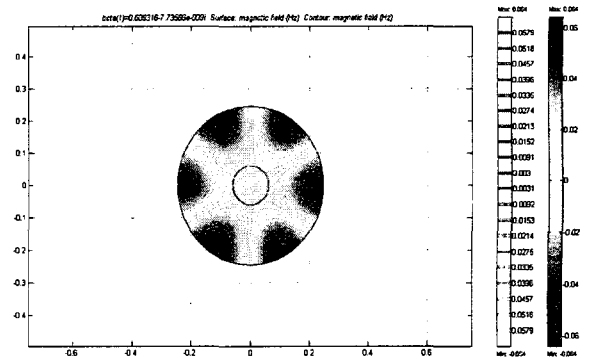
표 4 362[kV] GIS 모선에서 각 TE_{mn} 모드의 주파수 영역

Table 4 Frequency region of TE_{mn} modes in 362[kV] GIS busbar

TE _{mn}	TE ₁₁	TE ₂₁	TE ₃₁	TE ₀₁
주파수 영역 [MHz]	227 ~ 470	471 ~ 708	709 ~ 832	833 ~ 908
TE _{mn}	TE ₁₂	TE ₄₁	TE ₂₂	TE ₅₁
주파수 영역 [MHz]	909 ~ 997	998 ~ 1135	1136 ~ 1237	1238 ~ 1353



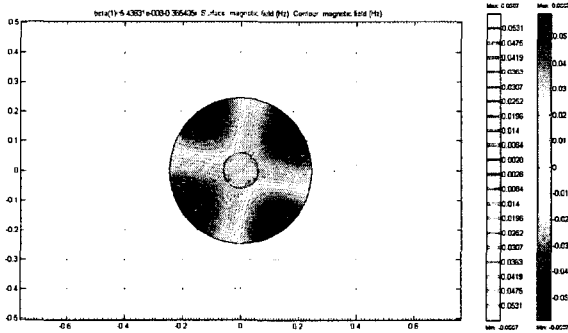
(c) TE₃₁ Mode (f_c =813 MHz)



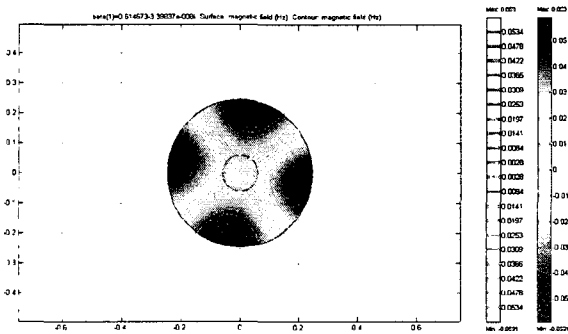
(d) TE₃₁ Mode (814 MHz)

그림 4 차단주파수 f_c 에서 자계분포 방향의 회전

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



(a) TE₂₁ Mode (f_c =584 MHz)



(b) TE₂₁ Mode (585 MHz)

또한, 그림 4에서와 같이 같은 모드, 같은 차수의 TE₂₁ 모드가 차단주파수를 경계로 자계분포가 변화되는 것을 확인할 수 있었다. TE₂₁ 모드는 약 45°, TE₃₁ 모드는 약 30°가 회전하였으며, 이는 90°를 차수 m으로 나뉜 각(angle)만큼 회전한 것이다.

4.2 GIS내 센서의 취부위치와 신호의 감쇄

최근 GIS내에서 PD신호의 검출효율을 높이고, 외부노이즈의 영향을 최소화 하기위해 내장형 센서의 사용을 권고하고 있으며, 이러한 내장형 센서를 취부하기 위해서는 GIS 설계시부터 센서의 취부위치를 고려하여야 한다.

그림 5는 362[kV]급 GIS에 설치되어있는 센서의 위치와 TE₁₁ 모드의 자계분포를 나타낸 것이다. 설치되어 있는 센서의 위치는 지표면을 기준으로 90°의 위치에 설치되어있으며, (a)의 경우는 센서의 위치에서 자계의 세기가 강하게 분포하는 것을 볼 수 있으나, TE₁₁ 모드의 차단주파수를 기점으로 자계의 방향이 회전하면서 가장 약한 자계세기가 센서의 위치에 분포하는 것을 볼 수 있다. 이렇게 자계분포는 전파파의 전파모드에 따라 다르고, 또한 차단주파수를 경계로하여 자계분포의 방향이 변화한다.

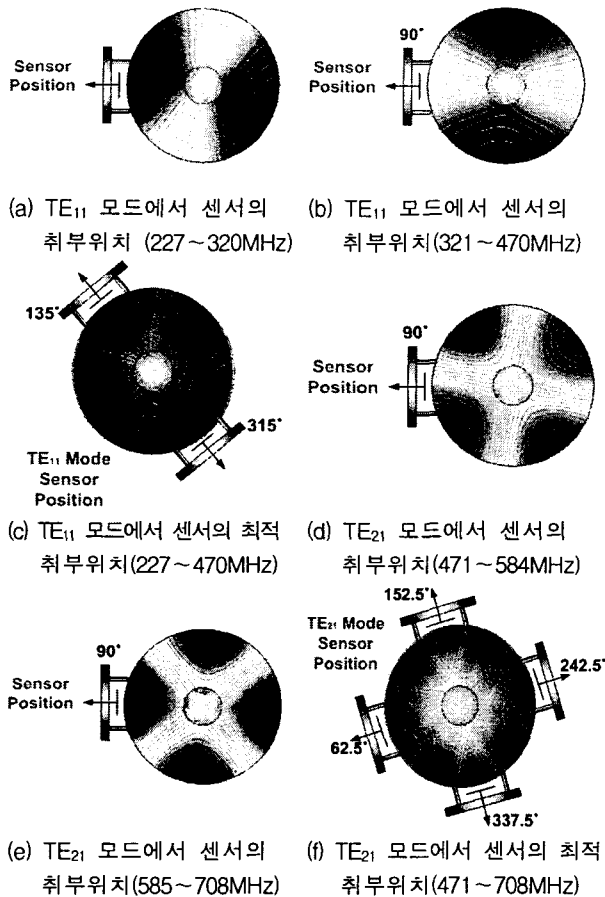


그림 5 각 주파수 대역에서 자기분포와 센서의 위치
 Fig. 5 Magnetic field distribution and sensor position at each frequency band

그림 6은 전기연구원의 362[kV] GIS 실험모델이며, GIS 외함의 외경은 492[mm]이고 내부컨덕터의 외경은 120[mm]이다. 3개의 스페이서가 취부 되어있으며, 4개 센서의 위치에서 부분방전 신호를 측정하였다.

$$DR (Damping rate) = 20 \cdot \log \{ F [f_c(t)] \} - 20 \cdot \log \{ F [f_i(t)] \} \quad (13)$$

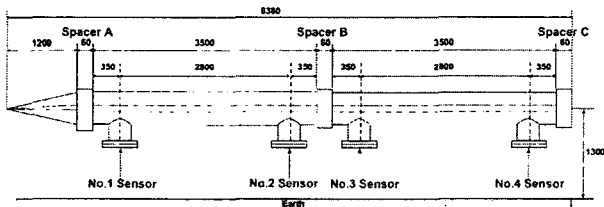


그림 6 전기연구원 362[kV] GIS 실험모델
 Fig. 6 362[kV] GIS mock-up model in KERI

그림 7은 그림 6의 No.1 센서와 No.2 센서에서 측정된 신호를 식 (13)을 이용하여 GIS 모선에서 신호의 감쇄를 [dB]를 시뮬레이션한 그래프이며, 그 위에 표 4에서 구한 TE₁₁ 모드의 각 모드별 주파수영역과 차단주파수(f_c)을 표

시한 그림이다. 이를 그림 5의 자기분포와 센서위치의 위치를 비교해보면 TE₁₁ 모드는 차단주파수(320MHz) 이상의 영역에서 신호의 감쇄가 커지고, TE₂₁ 모드에서는 차단주파수(584MHz) 이상의 영역에서 신호가 커지는 것을 설명할 수 있게 된다. 이와 같이 GIS내에서 PD신호가 전파하면서 자기분포가 변화하게 되며, 이로 인해 센서의 취부위치에서 자계의 세기 또한 변화하게 된다. 현재 한전 시방서에는 광대역 센서의 사용을 권고하고 있으나 PD 신호를 분석하는데 있어서 특정 주파수 대역을 주의 깊게 검출하기 위해서는 센서의 취부방향이 충분히 고려되어야 한다.

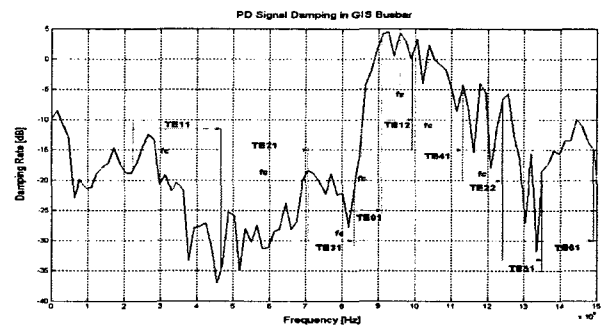


그림 7 GIS 모선에서 부분방전 신호의 감쇄
 Fig. 7 Damping of PD signal in GIS busbar

5. 결 론

본 논문에서는 362[kV] GIS 구조에 의한 전자파의 전파모드별 차단주파수를 산출하였으며, FEM 프로그램을 이용하여 GIS내 각 전파모드의 전자계분포를 시뮬레이션 하였다.

FEM 프로그램을 이용하여 362[kV] GIS내 TE/TM파의 자기분포를 해석한 결과 TE_m/TM_m파의 차수(m,n)에 따른 각각의 주파수 범위를 구할 수 있었으며, 모드의 같은 차수를 갖는 파는 차단주파수를 경계로 하여 자기분포가 90°/차수(m)으로 나눠준 각만큼 회전한다는 것을 확인할 수 있었다.

GIS 내에서 부분방전 현상을 빠짐없이 검출하기 위해서는 센서의 배치뿐만 아니라 센서의 감도 또한 최적으로 이루어져야 한다. 센서의 감도는 센서 자체의 성능에 크게 좌우되지만, 또한 각각의 TE_m 모드, 차단주파수에 따른 자기분포의 변화와 센서의 취부 방향에 영향을 받게 된다.

센서의 특성을 너무 높은 주파수 대역까지 확장시켜 놓으면 신호처리 측면에서 불리하므로 적절한 범위로 한정시킬 필요가 있다. 또한 검출된 전자파 신호는 진단시스템에서 적절하게 처리되어 사용자가 원하는 특정 대역에서의 검출 신호로서 결합을 검출하게 되므로, 특정 주파수 대역 또는 특정 모드에서의 검출 효과를 높이기 위해서 센서의 취부 방향에 대한 연구는 반드시 필요하다.

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.

감사의 글

본 연구는 한국전기연구원의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 김광화, 선종호, 최재구, "GIS 예방진단을 위한 센서적용 및 운영실태조사", 한국전력공사, pp. 1, 1999.
- [2] 권동진, 윤진열, "변전설비 진단기술 개발 연구", 전력연구원, pp. 3-4, 1998.
- [3] 이도훈, 김재철, 송승엽, 신중은, 김광화, "GIS내에서 PD Pulse 전파특성에 관한 연구", 대한전기학회 춘계 학술대회 논문집, pp. 241-243, 2003. 05.
- [4] 이도훈, 김재철, 송승엽, 신중은, 김광화, "EMTP를 이용한 GIS내 부분방전 펄스의 감쇄특성 해석", 한국조명전기설비학회 춘계학술대회논문집, pp. 103-105, 2003. 11.
- [5] M C Zhang, "High order mode waves excited in GIS", High voltage engineering symposium, Vol. 5, No. 467, pp. 148-151, 1999.
- [6] M C Zhang, "TEM and TE mode waves excited by partial discharge in GIS", High voltage engineering symposium, Vol. 5, No. 467, pp. 144-147, 1999.
- [7] Xu Gaofeng, Sun Caixin, Tang Ju, Tang Zhide, Li Jian, "The analysis on propagation characteristics of electromagnetic waves excited by PD in GIS", Electrical Insulating Materials ISEIM 2001, pp. 367-370, 2001.
- [8] Hiroshi Imagawa, "PD signal propagation characteristics in GIS and it's location system by frequency components comparison", IEEE Trans., Vol. 16, No. 4, pp. 564-570, October 2001.
- [9] David M. Pozar, "Microwave engineering", John Wiley & Sons INC, pp. 104-144, 1990.
- [10] M D Judd, O Farish, "Transfer functions for UHF partial discharge signals in GIS", High voltage engineering symposium, Vol. 5, No. 467, pp. 74-77, 1999.
- [11] Jiansheng Wang, "Propagation characteristics of UHF electromagnetic waves induced by partial discharge in GIS", IEEE International symposium on electrical insulation, pp. 308-310, April, 2000.
- [12] FEMLAB Rule Book, Electromagnetics Module

저 자 소 개



김재철(金載哲)

1955년 7월 12일생. 1979년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1983년 8월 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 8월 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 숭실대학교 전기공학과 교수.

Tel : 02)820-0647

E-mail : jckim@ssu.ac.kr



이도훈(李都勳)

1976년 3월 25일생. 2002년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 LG산전(주) 전력연구소 신전력기기연구단 연구원

Tel : 043)261-6556

E-mail : dhlee@lgis.com



송승엽(宋承燁)

1977년 1월 3일생. 2002년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사)

Tel : 02)817-7966

E-mail : ssy4623@ssu.ac.kr



김광화(金光和)

1956년 5월 12일생. 1983년 부산대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 한국전기연구원 전력설비 진단연구그룹장.

Tel : 055)280-1570

E-mail : khkim124@keri.re.kr