

文章编号:1000-582X(2004)12-0032-05

GIS局部放电信号及内置传感器检测分析*

唐炬¹,彭文雄¹,孙才新¹,侍海军²,许中荣¹

(1. 重庆大学 高电压与电工新技术教育部重点实验室,重庆 400030;

2. 江苏省苏州供电公司 常熟供电局,江苏 常熟 215004)

摘要:气体绝缘组合电器(GIS)局部放电不仅激发横向电磁波(TEM),而且会激发横向电场波(TE)和横向磁场波(TM)。利用电磁场中的并矢格林函数理论,推导出了GIS中PD信号在任意点激发瞬变电场的计算表达式,在计算GIS中PD激发的电场时,应考虑TEM波和检测频段内所有高次模波的贡献。在实验室GIS模拟装置上,设计了灵敏度及抗干扰能力优于外置传感器的内置传感器,并用天线模型对其进行了频率响应特性分析,最后直接用高参数数字存储示波器测量了由金属突出物缺陷产生的局部放电信号。

关键词:气体绝缘组合电器;局部放电;电磁波;传感器;响应特性

中图分类号:TM835

文献标识码:A

在GIS内部,由于生产制造或者长期运行过程中出现的潜伏性绝缘缺陷,可能导致不同程度的局部放电。GIS内部局部放电总是在小范围里发生,且具有极快的击穿特性。这种持续时间极短的陡脉冲,包含了从低频到1 GHz频率成分的能量分布,局放脉冲所激发的电磁波不仅以横向电磁波(TEM)形式传播,而且会建立横向电场波(TE)和横向磁场波(TM)^[1]。

通过对GIS局部放电在线监测,可以有效地监视GIS绝缘状况,并及时发现内部绝缘缺陷。由于局部放电信号微弱,而且等值频率极高,因而要求传感器有很高的灵敏度和良好的频率响应特性。目前,国外普遍采用将传感器装设在GIS内部^[2],传感器为电容型探头,一般为圆板型结构,国内则采用外部天线^[3-4],与内部传感器相比,外部天线的灵敏度和抗干扰能力较差。

笔者首先分析了GIS局放脉冲激发的电磁信号及其传输特性,利用实验室GIS模拟装置,设计制作了两种结构的内置传感器,以天线模型分析传感器的超高频频率响应特性,并对GIS模拟装置内金属突出物缺陷激发的局部放电脉冲信号进行检测。

1 GIS局部放电脉冲激发的电磁波与传输

1.1 GIS内部局部放电脉冲与电磁场

由于GIS本身是一个良好的同轴波导结构,当

GIS中发生局部放电时,PD将激发横向电磁场波(TEM)、横向电场波(TE)和横向磁场波(TM)。因此,计算GIS中PD在任意点激发的瞬变电场时要考虑各种波型的贡献。

由于PD脉冲的等值频率极高,采用常用的电场数值计算方法计算该电场存在相当的难度^[5]。笔者引入并矢格林函数理论,导出了该电场的计算公式。由于实际GIS中的工频电场沿径向分布,为简化计算,可以认为PD电流只沿径向流动,而且只发生在局部区域,不考虑工频电磁场的影响。

理想同轴波导中任意电流分布激发的瞬变电场可由下式表示^[6]:

$$E(R) = j\omega\mu_0 \iiint_V \vec{G}(R|R')J(R')dV' \quad (1)$$

式中, $E(R)$ 为柱坐标系中 $R=(r,\phi,z)$ 处的电场强度向量; $J(R')$ 为 $R'=(r',\phi',z')$ 源位置处PD电流密度向量; $\vec{G}(R|R')$ 为适用于同轴波导结构的第一类并矢格林函数,它是 R 和 R' 的函数; V' 为刚好包围PD电流源的空间体积。

PD电流脉冲将激发TEM、TE和TM波,各种波型对应的并矢格林函数不同,同轴波导结构的各种并矢格林函数具体形式如下^[1]:

1) TEM波

* 收稿日期:2004-08-20

基金项目:重庆市科技公关资助项目(7795)

作者简介:唐炬(1960-),男,四川蓬溪人,重庆大学教授,博士生导师,从事电气设备绝缘在线监测及故障诊断研究。

$$\vec{G}_{TEM}(R|R') = \frac{Z_0}{4\pi \ln(b/a)} \frac{1}{j\omega\mu_0} \frac{\exp[-j\beta_0(z-z')]}{rr'} \quad (2)$$

2) TE波

$$\vec{G}_{TE_{nm}}(R|R') = \frac{j\pi}{8} \frac{D}{N} \quad (3)$$

其中

$$\begin{cases} D = (2 - \delta_0^n) J_n'^2(u_{nm}b) M_{nm}(R') \times \\ M_{nm}(R) \exp[j\beta_u(z-z')] \\ N = [J_n'^2(u_{nm}a) (1 - \frac{n^2}{u_{nm}^2 b^2}) - \\ J_n'^2(u_{nm}b) (1 - \frac{n^2}{u_{nm}^2 a^2})] \beta_u \\ M_{nm}(R) = \frac{n}{r} \cos(n\phi) Z_n(u_{nm}r) \hat{r} - \\ u_{nm} \sin(n\phi) Z_n'(u_{nm}r) \hat{\phi} \\ Z_n(u_{nm}r) = J_n(u_{nm}r) Y_n'(u_{nm}a) - \\ Y_n(u_{nm}r) J_n'(u_{nm}a) \\ \beta_u = \sqrt{\beta_0^2 - u_{nm}^2} \end{cases} \quad (4)$$

u_{nm} 是方程(5)的 m 阶根:

$$J_n'(ua) Y_n'(ub) - Y_n'(ua) J_n'(ub) = 0 \quad (5)$$

3) TM波

$$\begin{aligned} \vec{G}_{TM_{nm}}(R|R') &= \frac{j\pi}{8\omega^2 \mu_0 \epsilon_0} \frac{(2 - \delta_0^n) v_{nm}^2 J_n^2(v_{nm}b)}{J_n^2(v_{nm}a) - J_n^2(v_{nm}b)} \times \\ &[\frac{\beta_v}{v_{nm}} N_{nm}(R') N_{nm}(R) + j N_{nm}(R') P_{nm}(R) - \\ &j P_{nm}(R') N_{nm}(R) + \frac{v_{nm}^2}{\beta_v} P_{nm}(R') P_{nm}(R)] \times \\ &\exp[j\beta_v(z-z')] \end{aligned} \quad (6)$$

其中

$$\begin{cases} N_{nm}(R) = -v_{nm} \cos(n\phi) X_n'(v_{nm}r) \hat{r} + \\ \frac{n}{r} \sin(n\phi) X_n(v_{nm}r) \hat{\phi} \\ P_{nm}(R) = \cos(n\phi) X_n(v_{nm}r) \hat{z} \\ X_n(v_{nm}r) = J_n(v_{nm}r) Y_n(v_{nm}a) - Y_n(v_{nm}r) J_n(v_{nm}a) \\ \beta_v = \sqrt{\beta_0^2 - v_{nm}^2} \end{cases} \quad (7)$$

v_{nm} 是方程(8)的 m 阶根:

$$J_n(va) Y_n(vb) - Y_n(va) J_n(vb) = 0 \quad (8)$$

1.2 GIS同轴腔体中的电磁波传输特性

对TEM波来说, $E_z = H_z = 0$, TEM波的电场在二维空间满足的条件, 与二维静电场相同, 即其电场在横截面内的分布与相同边界条件下的二维静电场的分布相同。

图1为同轴线横截面示意图, 将GIS视为同轴线,

在圆柱坐标系中, 电位函数 Φ 满足二维拉普拉斯方程^[7]

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \frac{\partial \Phi}{\partial r}) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \phi^2} = 0 \quad (9)$$

由边界条件: $r=a$ 处, $\Phi = U_0$; $r=b$ 处, $\Phi = 0$, 可得沿正 z 方向传输的TEM波的电场和磁场分别为

$$\begin{cases} E_r = \frac{U_0}{\ln(\frac{b}{a})} \frac{\hat{r}}{r} e^{jkz} \\ H_\phi = \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \frac{U_0}{\ln(\frac{b}{a})} \frac{\hat{\phi}}{r} e^{jkz} \end{cases} \quad (10)$$

式中, $k = \omega \sqrt{\epsilon\mu}$ 为波沿 z 轴单位长度的相位移。

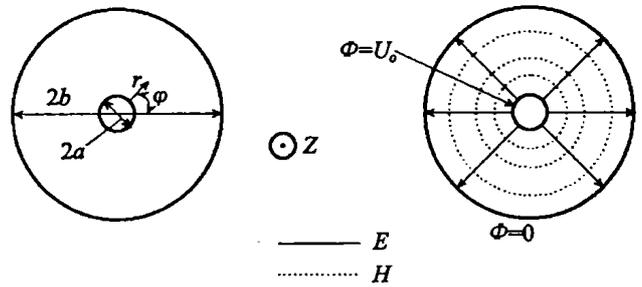


图1 GIS同轴线中TEM模的场结构示意图

TEM波只存在于那些能允许二维静电场存在的系统中。GIS同轴结构属于双导线系统, 从理想状态看, 任何频率的TEM波都能在GIS同轴结构导体中传播。实际中, GIS同轴线存在导体损耗、介质损耗以及反射损耗, 随着频率的提高, 信号的衰减逐渐增大。文献[1]表明, TEM波在GIS内100 MHz左右达到最大值, 然后大小会随着频率的增高而下降。

同时, GIS装置可以视为同轴波导。针对GIS同轴结构, 取圆柱系坐标 r, ϕ, z , 电磁波在 $a < r < b$ 范围内传输(见图2)。

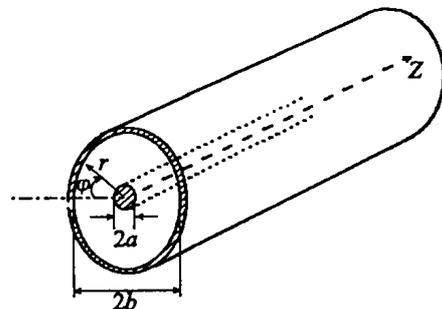


图2 同轴波导及其坐标系

解波动方程, 得同轴线中可能存在的TE波和TM波的纵向分量为:

$$H_z(\text{或 } E_z) = R(r) \Phi(\phi) e^{-jkz} \quad (11)$$

式中, $\Phi(\phi) = A \begin{cases} \cos n\phi \\ \sin n\phi \end{cases}$, n 为正整数; $R(r) = B_1 J_n(k_c r) + B_2 N_n(k_c r)$, $J_n(k_c r)$ 、 $N_n(k_c r)$ 为第一、二类贝塞尔函数,

A, B_1, B_2 为常数。

这些纵波都具有一定的截止波长值,相对于同轴线中的 TEM 波来说,它们都是高次型波。同轴线中 TE、TM 的截止波长由边界条件确定^[1,8]。

1) TM 模截止波长的确定

对于 TM 模, $H_z = 0$, 有

$$E_z = [CJ_n(k_c r) + DN_n(k_c r)] \begin{cases} \cos n\varphi \\ \sin n\varphi \end{cases} e^{-j\beta z} \quad (12)$$

将边界条件 $E_z|_{r=a,b} = 0$ 代入上式可得

$$\frac{J'_n(k_c a)}{N'_n(k_c a)} = \frac{J'_n(k_c b)}{N'_n(k_c b)} \quad (13)$$

上式中的 k_c 的解可有无穷多个,每个 k_c 对应着一个 TM 波型,由近似解法求解方程(13),可得^[7]

$$\begin{cases} k_c = \frac{m\pi}{b-a}, (m = 1, 2, 3, \dots) \\ (\lambda_c)_{TM_{nm}} = \frac{2(b-a)}{m} \end{cases} \quad (14)$$

对 TM 模, λ_c 的值与 n 无关,只要 i 相同,不管 n 取何值,所对应的波型将有同样的截止波长值。

2) TE 模截止波长的确定

对于 TE 模, $E_z = 0$, 有

$$H_z = [AJ_n(k_c r) + BN_n(k_c r)] \begin{cases} \cos n\varphi \\ \sin n\varphi \end{cases} e^{-j\beta z} \quad (15)$$

将边界条件 $\frac{\partial H_z}{\partial r}|_{r=a,b} = 0$ 代入上式得

$$\frac{J_n(k_c a)}{N_n(k_c a)} = \frac{J_n(k_c b)}{N_n(k_c b)} \quad (16)$$

由近似解法求解方程(16),可求得 k_c 和截止波长^[7]

$$\begin{cases} (\lambda_c)_{TE_{n1}} = \frac{\pi(a+b)}{n} & (n \neq 0, m = 1) \\ (\lambda_c)_{TE_{0m}} = \frac{2(b-a)}{m} & (n = 0, m = 1, 2, 3, \dots) \\ (\lambda_c)_{TE_{nm}} = \frac{2(b-a)}{m-1} & (n > 0, m = 2, 3, 4) \end{cases} \quad (17)$$

在所有高次模波即 TE 模和 TM 模中,截止频率最低的为 TE_{11} 波,为

$$(f_c)_{TE_{11}} = \frac{c}{\pi(a+b)} \quad (18)$$

对 500 kV GIS, 如 $a = 0.089$ m, $b = 0.254$ m, 则 $f_{c(TE_{11})} = 278$ MHz, 即局放信号频率在 278 MHz 以上时会有纵波传播。

2 内置传感器检测响应特性

结合实验室的 GIS 模拟装置尺寸,研制了用于检测 GIS 局部放电的圆板型和圆环型两种内置传感器,其结构和安装基本不影响 GIS 内部的电场分布,结构

如图 3 所示。

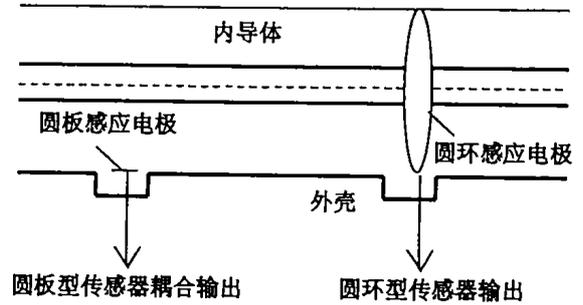


图 3 内置传感器安装分布图

内电极可以看成是一个接收天线,激发局部放电的缺陷就是一个发射天线。在超高频段局放信号检测中,内置传感器天线模型分析较电容分压器模型合理,这已为国内外许多学者所证明^[9]。笔者结合电磁耦合原理及天线模型分析,为所设计的内置传感器建立了一个天线计算模型,并对传感器天线模型进行计算。

2.1 传感器天线电路模型原理

在超高频段,传感器电极是一个开路电压为 U_0 的接收天线,图 4 表示了天线模型下的传感器电路模型^[9]。图中天线阻抗为 Z_a , 近似为电容 C_a 和 R_a 的串联, Z_a 取决于信号频率, $Z_a = R_a + jX_a$ 。阻抗 Z_L 是测量系统的输入阻抗,包括从传感器电极到传感器输出的信号引线, $Z_L = R_L + jX_L$ 。

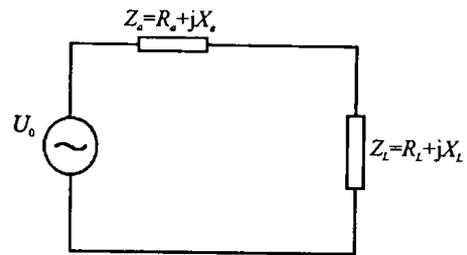


图 4 传感器天线电路模型等效电路

作为内置传感器,由一个感应电极和一小段信号引线组成。在进行天线分析时,应考虑 GIS 法兰形状,即传感器信号引线与法兰侧壁组成的一段长为 l_D 的均匀传输线(其阻抗 $Z_D \approx 200 \Omega$),图 5 为完整的等值回路。

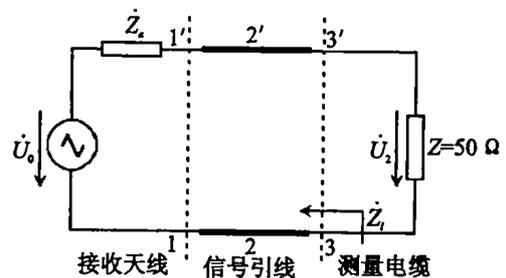


图 5 内置传感器等值回路

图 5 中
$$\dot{Z}_a = R_a + \frac{1}{j2\pi f C_a} \quad (19)$$

从信号引线末端 33' 处看,输入阻抗

$$\dot{Z}_i = Z_D \times \frac{\dot{Z}_a + jZ_D \tan(\frac{2\pi l_D f}{c})}{Z_D + j\dot{Z}_a \tan(\frac{2\pi l_D f}{c})} \quad (20)$$

式中, c 为光速, $c = 3 \times 10^8$ m/s。

于是,对传感器电极处,给定信号电压 \dot{U}_0 时的频率响应可按式计算,由计算可以得到传感器的频率响应。

$$\left| \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_0} \right| = \frac{Z}{|Z + \dot{Z}_i|} \quad (21)$$

2.2 传感器响应特性分析

在 GIS 外壳里的圆板传感器可以看成是一个圆板天线,圆板天线半径为 $r = a$ 。以两个特性参数 α, β 可计算 C_a 和 R_a 的数值:

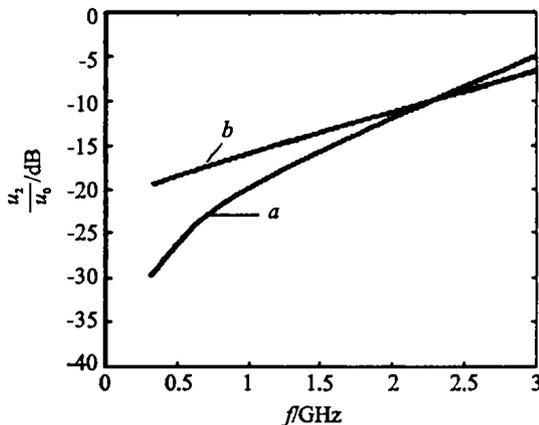
$$\begin{cases} R_a = \alpha/\beta^2 \\ C_a = \beta/2\pi \\ \alpha = S/f^2 \\ \beta = S/f \end{cases} \quad (22)$$

式中, α, β 与电极面积 S 和电磁波频率 f 有关。

天线理论中,在一侧附有导体薄片(接地板)的介质基片上敷着辐射或接收单元(导体片),即构成微带贴片天线,即通常所说的微带天线^[10-11]。内置圆环传感器感应电极就是紧贴着 GIS 外壳接地片上,可以把圆环传感器近似视为宽 $W = 4$ mm,长 $l = 2\pi \cdot R \approx 390$ mm 的矩形贴片。根据微带天线特性,输入阻抗计算很复杂^[11],笔者进行了近似计算,选取微带天线内阻抗计算公式为

$$\begin{cases} R_a = 90(\frac{c}{f})^2/W^2 \\ C_a = W \cdot l/2\pi \cdot f \end{cases} \quad (23)$$

根据上式可以得到不同频率下的天线输入阻抗,在天线回路模型中,由计算得到的频率响应特性如图 6 所示:



a. 圆板传感器; b. 圆环传感器
图 6 内置传感器超高频响应特性

从图 6 可以看到:内置圆环传感器频率响应曲线在超高频段(200 MHz ~ 3 GHz) 范围内几乎为一条上升的直线,内置圆板传感器频率响应曲线在 500 MHz 以上为线性,前者的线性范围更宽,频率响应特性更优越;局部放电信号频率越高,传感器增益越大,即天线接收信号的能力越强;在 2.3 GHz 频率以下内置圆环传感器的响应增益较圆板传感器大。

3 内置传感器局部放电实测

在实验室 GIS 模拟装置中,用圆板传感器和圆环传感器进行了局部放电脉冲信号实测。模拟装置内充有 0.5 MPa 的 SF₆ 与 N₂ 混合气体(体积比:4/1),人工模拟缺陷为固定在 GIS 内导体上的金属突出物,试验接线如图 7 所示。

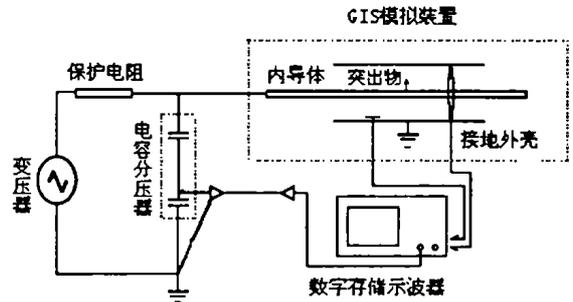


图 7 局部放电检测接线示意图

两种传感器测得的局部放电信号频谱 P 如图 8 所示,传感器耦合的信号不加任何前置放大器,信号由数字存储示波器记录。

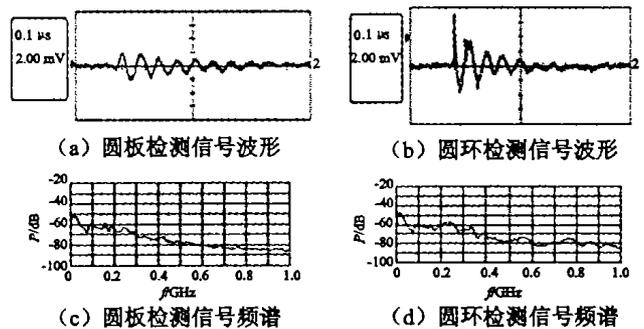


图 8 传感器检测局放信号结果

由实测结果可知,内置圆环传感器感应放电脉冲信号比圆板传感器感应的信号强。图 8(c)、(d) 是两种传感器耦合到的局部放电频谱,在没有进行信号放大的时候,直接从示波器观察时局部放电信号能量主要分布在甚高频及以下范围,在甚高频及以下频段(0 ~ 300 MHz)可以不通过信号放大就可以利用示波器监测局放信号;由圆环传感器检测局部放电信号频谱可以看到耦合的频率可以覆盖 0 ~ 1 GHz 范围。

GIS 局部放电信号包含从低频到超高频段的丰富频率成分,因此内置传感器既通过电容耦合的方式传感局放信号,也通过天线接收的方式传感局放信号,内

置传感器实际所检测到的局部放电信号是两种方式共同作用的结果。笔者所研制的内置传感器及局部放电测量系统,实际上是一个超宽频带测量系统,有利于提取 GIS 局部放电信号所包含的丰富信息。

4 结 论

1) GIS 局部放电脉冲信号不仅激发 TEM 波,而且能激发横向电波及横向磁波,利用并矢格林函数理论导出了 GIS 中 PD 激发的超高频瞬变电场的计算公式,该电场表达式导出了对 UHF 法检测 GIS 局部放电的原理。

2) 以天线模型进行的频率响应特性分析结果表明,研制的内置圆板及圆环传感器频率响应曲线在超高频段近似为上升的直线,具有线性的频率响应特性;局部放电信号频率越高,传感器增益越大,亦即天线接收信号的能力越强;内置圆环传感器的响应增益较圆板传感器大。

3) 局部放电实测结果证明,由内置传感器所检测人工模拟金属突出物缺陷产生的局放信号能量主要分布在甚高频段及以下;检测的局放信号频谱结果证实了内置圆环传感器响应增益大于圆板传感器的增益;内置传感器既通过电容耦合的方式传感局放信号,也通过天线接收的方式传感局放信号;检测的局放信号包含了横波与纵波的各自贡献,是一个超宽频带测量系统,有利于提取 GIS 局部放电信号所包含的丰富信息。

参考文献:

- [1] JUDD M D, FARISH O, HAMPTON B F. The Excitation of UHF Signals by Partial Discharge in GIS[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1996,3(2): 213 - 228.
- [2] JUDD M D, FARISH O, HAMPTON B F. Broadband Couplers for UHF Detection of Partial Discharge in Gas-insulated Substations[J]. IEEE Proc-sci Meas Technol, 1995, 142(3):237.
- [3] 邱毓昌. 用超高频法 GIS 绝缘进行在线监测传感器[J]. 高压电器, 1997, 33(4):36 - 40.
- [4] 覃剑, 王昌长, 邵伟民. 特高频在电力设备局部放电在线监测中的应用[J]. 电网技术, 1997,21(6):33 - 36.
- [5] HAMPTON B F. Diagnostic Measurements at UHF in Gas Insulated Substations [J]. IEEE Proc, 1988, 135c(2): 137 - 144.
- [6] 符果行. 电磁场中的格林函数法[M]. 北京:高等教育出版社,1993.
- [7] 吕善伟. 微波工程基础[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,1995.
- [8] 张鸣超, 王建生, 邱毓昌. GIS 中局部放电产生的超高频电磁波及其测量[J]. 高电压技术, 1998, 24(2): 22 - 25.
- [9] 王建生, 邱毓昌, 吴向华, 等. 用于 GIS 局部放电检测的超高频传感器频率响应特性[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(8):42 - 45.
- [10] 谢处方, 邱文杰. 天线原理与设计[M]. 西安:西北电讯工程学院出版社, 1985.
- [11] 单秋山. 天线[M]. 北京:国防工业出版社, 1989.

GIS Partial Discharge Signal and Its Internal Sensor Detection

TANG Ju¹, PENG Wen-xiong¹, SUN Cai-xin¹, SHI Hai-jun², XU Zhong-rong¹

(1. Key Laboratory of High Voltage Engineering and Electrical New Technology

Under the State Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. Changshu Power Supply Department, Jiangsu Province Suzhou Power Supply Company, Changshu 215004, China)

Abstract: Partial discharge electromagnetic waves in GIS propagate is not only in the transverse electric and magnetic (TEM) mode, but also in transverse electric(TE) and transverse magnetic(TM) mode. The paper deduces out the mathematic expressions transient field excited by PD in GIS anywhere by using dyadic Green function theory. The contributions of TEM mode and all high order modes in the detecting frequency scope should be taken into consideration when calculating the electric field excited by PD in GIS. In simulative GIS laboratory, the designed inner couplers are superior to other outer sensors in detection of partial discharge. Inner couplers for the GIS model are developed and their frequency responses are analyzed in antenna model. At last the PD pulses excited by man-made defect are detected by inner couplers using high parameters oscilloscope.

Key words: GIS; partial discharge; electromagnetic wave; sensor; response characteristic