

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.03.004

基于Friis的GIS局放信号与放电量定量计算研究

王永强¹, 张 斌²

(1. 华北电力大学河北省输变电设备安全防御重点实验室, 河北 保定 071003;

2. 国网山西省电力公司检修分公司, 太原 030032)

摘要: 迄今为止由于国内外学者对于特高频法监测GIS局部放电的放电信号与放电量的关联关系没有达成一致, 导致特高频法监测GIS局部放电在放电量的标定缺乏统一标准, 进而难以判断GIS局部放电的严重程度, 严重制约了特高频监测GIS局部放电的发展。鉴于此, 文中提出一种利用Friis传输方程对GIS局部放电定量计算的方法, 该方法将局部放电源作为发射天线模型化处理, 并引入Friis传输方程, 将计算等效为天线传输过程, 应用HFSS仿真得到的四阶Moore分形天线作为接收天线模型, 并结合天线收发相关理论, 得出GIS局部放电的视在放电量与特高频信号能量与信号电压峰值之间存在关联关系。通过GIS局部放电试验拟合验证, 实测结果表明局部放电在放电量与天线接收特高频信号的能量呈二次曲线关系和信号峰值电压呈一次函数关系。

关键词: 局部放电; Moore分形天线; Friis传输方程; 放电信号能量; 峰值电压

Calculation of Discharge Capacity Based on Friis Transmission Equation

WANG Yongqiang¹, ZHANG Bin²

(1. Hebei Provincial Key Laboratory of Power Transmission Equipment Security Defense, North China Electric Power University, Hebei Baoding 071003, China; 2. State Grid Maintenance Company of Shanxi Electric Power Company, Taiyuan 030032, China)

Abstract: So far, researchers have not reached an agreement on the relationship between discharge signal and discharge capacity in application of UHF method to monitoring GIS partial discharge, which leads to the absence of a uniform calibration standard for adopting UHF method to monitor the apparent discharge magnitude of GIS. Consequently, difficult determination of the GIS partial discharge severity restricts the development of GIS partial discharge monitoring with UHF method. The authors present a method for quantitative calculation of partial discharge of GIS by using Friis transmission equation. This method takes a partial discharge source as the transmitting antenna model, the Friis transmission equation as the antenna transmission process, and the fourth-order Moore fractal antenna as the receiving antenna model. Hence, the relationship between the apparent discharge magnitude of GIS partial discharge and the energy with peak value of UHF signal is obtained. GIS partial discharge test verifies that the apparent discharge magnitude shows a quadratic relationship with the energy of the UHF signal, and shows a linear relationship with the peak voltage.

Key words: PD; Moore fractal antenna; Friis transmission equation; discharge energy; peak voltage

0 引言

气体绝缘金属封闭组合电器(gas insulated switchgear, GIS)广泛应用于高压输变电系统中, 保证GIS的安全稳定运行是电力系统中极为重要的一

个部分^[1]。GIS局部放电的在线监测及带电检测, 已经成为判断设备运行状况的重要依据。相比于局部放电的脉冲电流检测、超声波监测和化学监测方法, 特高频(ultra high frequency, UHF)法具有抗电磁干扰能力强, 监测灵敏等优点, 得到广泛的认可^[2-3]。

收稿日期:2018-10-14; 修回日期:2018-12-17

基金项目:国网蒙东电力公司科技项目(SGTYHT/15-JS-191)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid East Inner Mongolia Electric Power Corporation (SGTYHT/15-JS-191).

近年来国内外学者对特高频法检测GIS局部放电做了大量的研究,主要集中在特高频信号传感器和信号处理的研究^[3-4],对于GIS局部放电视在放电量与特高频检测信号的关联关系研究较少^[5],目前只有IEC 60270:2006国际标准的脉冲电流法^[6]对放电量的定量检测做了明确规定,但是脉冲电流法检测频率低,干扰严重,无法实现现场的在线监测;而特高频法抗干扰能力强,适合在线监测,但是缺乏对视在放电量定量标定的统一共识,无法准确判定GIS放电严重程度,确定是否需要检修。因此国内外学者近几年对特高频信号与放电量关联关系做了大量研究,文[7-8]简要描述了UHF信号能量与放电量平方可能存在一定的线性关系。文[9-10]推导了变压器中针—板放电的UHF信号的累积能量与视在放电量存在二次函数关系,并通过相应试验数据进行验证。目前对UHF信号与视在放电量存在的关联关系只做了定性描述,而且计算繁琐或者缺乏严谨的局部放电定量计算模型,因此一种简便、严谨的局部放电定量计算模型研究是有极大意义的。

文中主要通过对放电量 and 接收天线的模型化设计,引入天线理论 Friis 传输方程,构建局部放电定量计算的模型,并经过系统的逻辑推导,得到了局部放电视在放电量与天线接收的特高频信号能量呈二次曲线关系,与信号电压峰值呈一次函数关系,并用实测实验数据进行了拟合,拟合曲线和拟合评价参数都进一步验证了基于 Friis 的 GIS 局部放电信号与放电量定量计算模型的正确性。

1 Friis 传输理论基础

Friis 传输方程是收发天线在信号传输过程的数学理论。设收发天线分别为 R 和 T , 间距为 r , 见图 1, 皆处于极化一致的最佳工作状态, 发射端天线输入功率为 P_t , 增益为 G_t , 对应方向角为 (θ, φ) , 接收天线的接收功率为 P_r , 增益为 G_r , 对应方向角为 (θ, φ) , 发射天线在接收端处产生的功率密度 S_i ^[11] 为

$$S_i = \frac{P_t D_t}{4\pi r^2} = \frac{P_t e_r D_t}{4\pi r^2} = \frac{P_t}{4\pi r^2} G_t(\theta, \varphi) \quad (1)$$

当接收天线的最大方向指向发射端时, 它能接收到的最大接收功率为

$$\begin{cases} P_{r \max} = A_e S_i \\ P_{r \max} = \frac{G_r}{4\pi} \frac{P_t G_t}{4\pi r^2} = \left(\frac{\lambda^2}{4\pi r}\right) P_t G_t G_r \end{cases} \quad (2)$$

式(2)称为 Friis 传输方程。

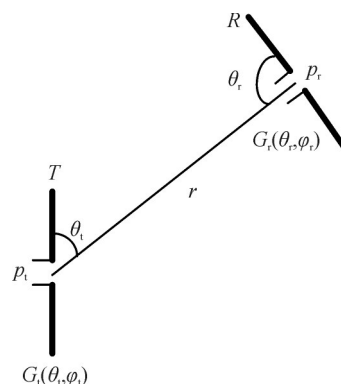


图1 收发天线示意图

Fig. 1 Schematic diagram of transmitting and receiving antennas

2 基于 Friis 的 GIS 局部放电定量计算模型

2.1 局放源模型

GIS 中局部放电会产生特高频信号, 因此可以将放电源等效为发射天线模型。首先需要设定局部放电的特征量, 局部放电量为 Q , 信号频率为 f , 信号电压为 U , 局部放电源距离接收天线距离为 r , 局部放电向周围空间发射放电信号, 由于局部放电的特高频信号不受现场运行的高压工频电磁环境影响, 且本实验所使用的四阶 Moore 分形天线为内置天线, 信号衰减较小, 且发射天线与接收天线之间无障碍物^[12-13], 进而使其发射端偏角为 0, 接收端偏角为 θ , 传播过程的模型见图 2。

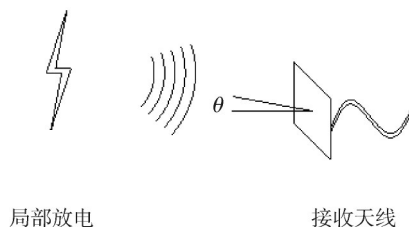


图2 信号传播过程

Fig. 2 Signal propagation

现场检测的局部放电信号一般都是衰减振荡信号, 这类信号电压可以采用指数振荡衰减模型来处理^[3, 14]

$$U(t) = A_p \cos[2\pi f_c(t - t_0) + a_c] e^{-\frac{t-t_0}{\tau}} \quad (3)$$

式(3)中: $t > t_0$; A_p 为经高频放大电路放大后的局部放电信号幅值; t_0 为放电脉冲起始时刻; f_c 为衰减振荡频率; τ 为衰减时间常数。

对于文中只针对能量积累与放电量, 计算模型可以不计及震荡部分, 简化后进行有限元划分的数学模型为

$$U(k) = Ae^{t_0 - k\Delta t} \quad (4)$$

图3为文中所使用的针板放电局放源模型,其参数见表1。

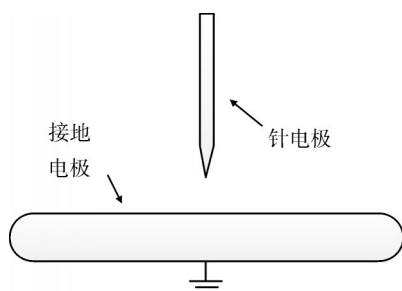


图3 针板放电模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of pin plate discharge model

表1 针板放电模型参数

Table 1 The model parameters of pin-to-plate discharge

针直 径/ mm	针长 度/ mm	针尖 锥角/ (°)	曲率 半径/ mm	板直 径/ mm	板厚 度/ mm	针板 间距/ mm
4	10.5	30	0.5	100	10	10

2.2 接收天线模型

局部放电特高频在线监测天线种类日益多样化。目前接收天线主要包括螺旋、分形和阵列天线3种^[4,15]。

不同种类的天线可以通过阻抗匹配设计或者匹配元件达到阻抗匹配的目的,因此文中设置接收天线的馈线是匹配的。

选取四阶 Moore 分形天线^[16-18]作为接收天线计算模型。天线的相关参数可以通过仿真确定,基于 HFSS 仿真得到^[19]见图4、图5(a)的四阶 Moore 分形天线实物及其相关特性示意图。用网络分析仪与 HFSS 仿真测得天线驻波比见图5(b)。根据电磁理论,天线驻波比符合要求,具有较好的频率响应特性。

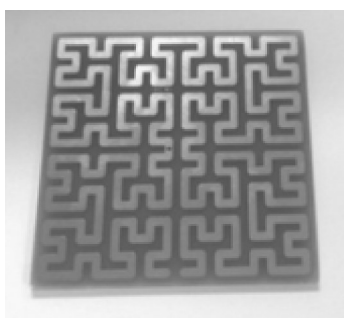
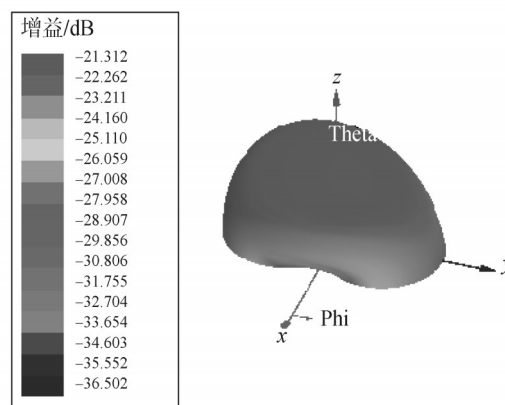
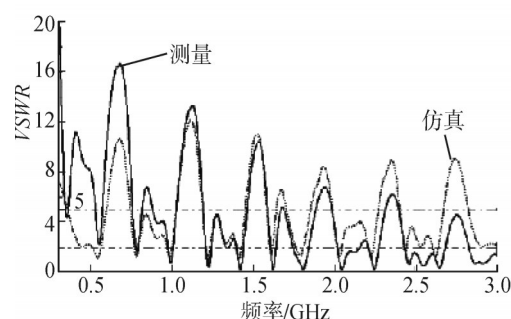


图4 四阶 Moore 分形天线实物图

Fig. 4 Realistic diagram of fourth-order Moore fractal antenna



(a) 四阶 Moore 分形天线方向图和增益



(b) 四阶 Moore 分形天线驻波比

图5 四阶 Moore 分形天线相关特性示意图

Fig. 5 Correlation characteristics schematic diagram of fourth-order Moore fractal antenna

2.3 基于 Friis 的 GIS 局部放电定量计算

任意方向上的天线增益 $G(\theta, \varphi)$ 为

$$G(\theta, \varphi) = GF^2(\theta, \varphi) \quad (5)$$

归一化功率方向图为

$$p(\theta, \varphi) = F^2(\theta, \varphi) \quad (6)$$

则任意方向的天线方向系数 $D(\theta, \varphi)$ 为

$$D(\theta, \varphi) = DF^2(\theta, \varphi) \quad (7)$$

因此接收天线的接收功率为

$$P_R = \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2 P_i G_i(\theta_i, \varphi_i) G_r(\theta_r, \varphi_r) e_p e_{at} e_o \quad (8)$$

将式(8)简化后可以得到如下关系式

$$P_R = \xi \cdot P_i \quad (9)$$

式(8)中, ξ 为 P_R 与 P_i 的关系系数,与接收信号的波长、天线的增益和方向系数等参数有关。

放电量 Q 是指局部放电释放的电荷数,单位为 pC, 因此

$$Q = \sum_{k=1}^{k=n} I(k) \cdot \Delta t = \frac{\Delta t}{R_L} \sum_{k=1}^{k=n} U_i(k) = \frac{\Delta t}{R_L} U \quad (10)$$

即可得到放电量与信号峰值之间成一次函数曲线关系为

$$A \cdot U = Q \quad (11)$$

式(11)中

$$A = \frac{\Delta t}{R_L} \quad (12)$$

$I(k)$ 表示局部放电开始后第 k 个采样点的电流值; R_L 为放电源的等效阻抗; Δt 表示每个点的采样时间; f 为采样频率,则 $\Delta t=1/f$,当采样频率一定时, t_k 为一个定值。

另外设采集信号的能量积累 W_s ,将局部放电信号按测得的信号时间积分,即得到局部放电的能量为

$$W_s = \sum_{k=1}^{k=n} P_R(k) \cdot \Delta t = \frac{\Delta t}{R_L} \sum_{k=1}^{k=n} U_R^2(k) \quad (13)$$

式(13)中: $P_R(k)$ 为第 k 个采样点的功率; $U_R(k)$ 为第 k 个采样点的电压。通过式(9)建立了能量积累与信号波形之间的关系,并且忽略天线本身的功率损耗。

$$\begin{cases} \xi P_i = P_R \\ \xi P_i \cdot \Delta t = P_R \cdot \Delta t \\ \xi \sum_{k=1}^{k=n} P_i(k) \cdot \Delta t = \sum_{k=1}^{k=n} P_R(k) \cdot \Delta t = \frac{\xi \Delta t}{R_L} \sum_{k=1}^{k=n} U_i^2(k) = W_s \end{cases} \quad (14)$$

$$\frac{\xi \Delta t}{R_L} \sum_{k=1}^{k=n} U_i^2(k) = W_s$$

又有式(4)得

$$U_i(k) = e^{\frac{\Delta t}{\tau}} U_i(K+1) \quad (15)$$

将式(15)带入式(10)

$$Q(k) = e^{\frac{\Delta t}{\tau}} Q(K+1) \quad (16)$$

进一步得到

$$Q = \frac{Q(1)(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}})}{1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}} \quad (17)$$

将式(10)、(15)、(16)带入式(15)可以得到式(18)所示推论:

$$\begin{cases} \frac{\xi \Delta t}{R_L} \sum_{k=1}^{k=n} U_i^2(k) = W_s \\ \frac{\xi R_L}{\Delta t} \sum_{k=1}^{k=n} Q^2(k) = W_s \\ \frac{\xi R_L}{\Delta t} \cdot \frac{Q^2(1)(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}})}{1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}} = W_s \end{cases} \quad (18)$$

由式(17)、(18)得到

$$\begin{cases} \frac{\xi R_L}{\Delta t} \cdot \frac{Q^2(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}})}{1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}} = W_s \\ \frac{\xi R_L}{\Delta t} \cdot \frac{(1 + e^{-\frac{\Delta t}{2\tau}})(1 - e^{-\frac{\Delta t}{2\tau}})}{(1 + e^{-\frac{\Delta t}{2\tau}})(1 - e^{-\frac{\Delta t}{2\tau}})} Q^2 = W_s \end{cases} \quad (19)$$

即得到放电量与接收的特高频信号能量成二次曲线关系

$$B \cdot Q^2 = W_s \quad (20)$$

式(20)中:

$$B = \frac{\xi R_L}{\Delta t} \cdot \frac{(1 + e^{-\frac{\Delta t}{2\tau}})(1 - e^{-\frac{\Delta t}{2\tau}})}{(1 + e^{-\frac{\Delta t}{2\tau}})(1 - e^{-\frac{\Delta t}{2\tau}})} \quad (21)$$

$$\xi = \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2 G_t(\theta_t, \varphi_t) G_r(\theta_r, \varphi_r) e_p e_{at} e_o \quad (22)$$

3 试验验证

3.1 试验平台研究

为了进一步实测实验研究局部放电与特高频接收信号能量之间的关系,文中搭建了局部放电特高频信号检测试验平台,试验接线平台接线示意图见图6。试验平台^[20-21]包括:252 kV GIS模型、TDTW-50/250型无晕高压试验变压器、250 kV 无局放电源、局部放电检测仪、分形天线、针一板放电模型与信号处理单元等,放电模型安装示意图见图7。

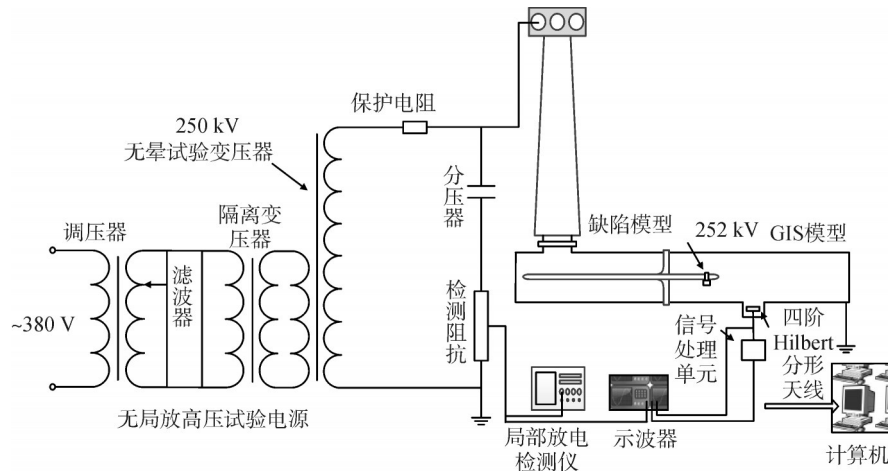


图6 实验系统接线图

Fig. 6 The experimental system wiring



图7 放电模型安装示意图

Fig. 7 Discharge model installation diagram

3.2 IEC 60270—2000 标准检测模型视在放电量

由于目前为止特高频法没有标定局部放电视在放电量的统一标准,所以必须按照 IEC 60270—2000 标准的脉冲电流法检测针板放电模型的视在放电量,并与特高频检测法同步采集,实时记录同一时刻的脉冲电流信号和特高频信号^[6,22]。脉冲电流法校准电路图见图8。

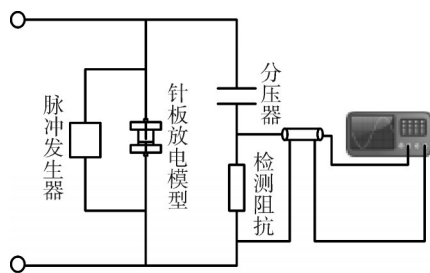


图8 脉冲电流法校准电路

Fig. 8 Pulse current calibration circuit

按图8所示脉冲电流法校准电路接线,将一个放电量可调的校准脉冲发生器与针板放电模型并联,产生已知放电量的脉冲信号,传入高频同轴电缆进入示波器,进而测量检测阻抗两端的电压峰值。测量校准曲线见图9,通过图9对比检测阻抗两端的电压峰值便可得到此时放电模型的视在放电量。

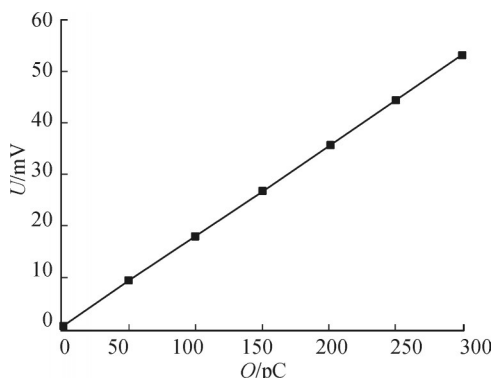


图9 校准曲线

Fig. 9 Calibration curve

3.3 实验步骤

1)按图3的实验系统接线图进行接线,在GIS模型试验腔体中充以0.5 MPa的SF₆气体,然后加压直至模型间隙击穿,记录间隙击穿的起始放电电压和

最后击穿电压。

2)在起始放电电压和最后击穿电压之间均匀设定3个电压测量值,3个电压下GIS放电状态分别命名为轻微放电、异常放电、临界击穿3个状态等级,分别在3个状态等级电压上利用脉冲电流法和特高频法同步进行测量采集。

3)将采集到的特高频信号、检测阻抗两端电压值进行分析处理,对基于Friis传输方程的GIS局放信号与放电量定量计算模型进行拟合验证。

3.4 放电量与接收的特高频信号拟合

文中通过GIS局部放电试验并使用所设计的四阶Moore分形天线与局部放电检测终端进行特高频信号采集,其放电量通过图9校准曲线标定。通过多次试验验证,所使用放电缺陷模型起始放电电压为35 kV,击穿电压为46.7 kV,所以取实验电压为35、40、45 kV分别代表轻微放电、异常放电、临界击穿3个状态等级。GIS局部放电试验所得的局部放电特高频信号见图10。

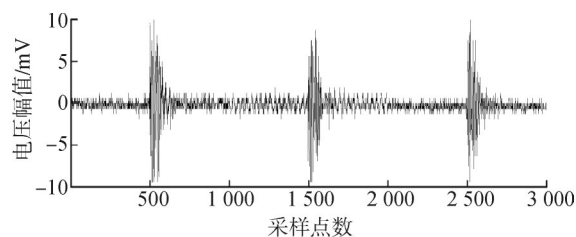


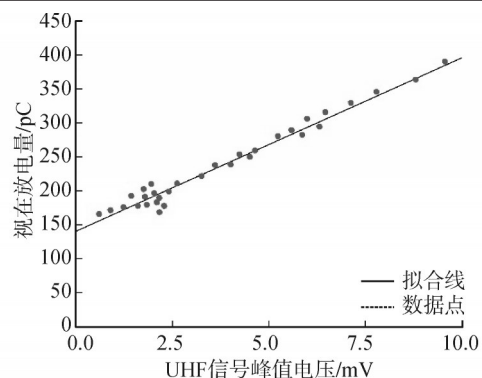
图10 局部放电 UHF 信号

Fig. 10 UHF PD signals

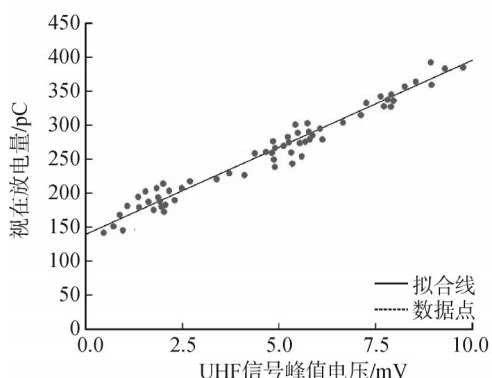
试验同时采集得到局部放电特高频信号与脉冲电流信号数据,并计算其放电量、特高频信号能量累积与信号峰值电压,并将放电量 Q 作为横坐标,特高频信号峰值电压与累积能量分别作为纵向分量,通过绘制关系图进而分析局放量与接收的特高频信号关系。放电量与UHF信号峰值电压和信号能量累积的关系示意图见图11、12,随着放电严重程度的增加,视在放电量 and UHF 信号峰值电压的拟合曲线以及视在放电量 and 能量累积的拟合曲线末端的数据点明显增多,所以,随着实验电压的增大,放电严重程度的增加,PD的幅值和放电量也跟着增加,但是由于实验电压等级差值较小,导致其PD的幅值和放电量的最大值增加不明显。

为了进一步定量描述特高频信号能量、信号电压峰值与局放视在放电量的关联关系,文中引入可决系数 f_d 和经验决定系数 K^2 证明上述实验数据点与拟合曲线是否紧密相关^[9-10]。其关系式为:

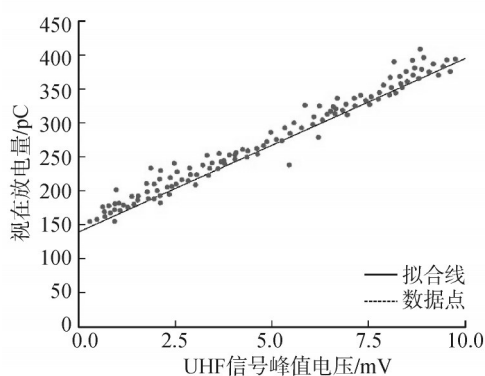
$$f_d = \frac{\sum w_i (Q_i - \bar{Q})^2}{\sum w_i (q_i - \bar{Q})^2} \quad (23)$$



(a) 轻微放电电量与UHF信号峰值电压关系



(b) 异常放电电量与UHF信号峰值电压关系



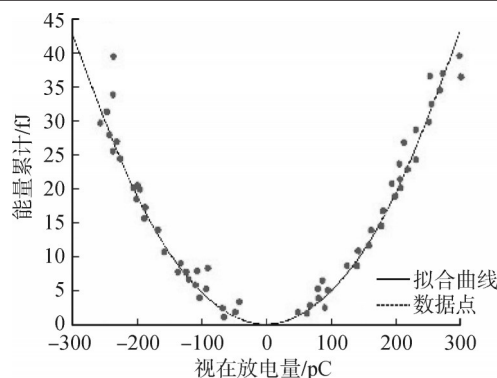
(c) 临界击穿放电电量与UHF信号峰值电压关系

图 11 放电电量与UHF信号峰值电压的关系

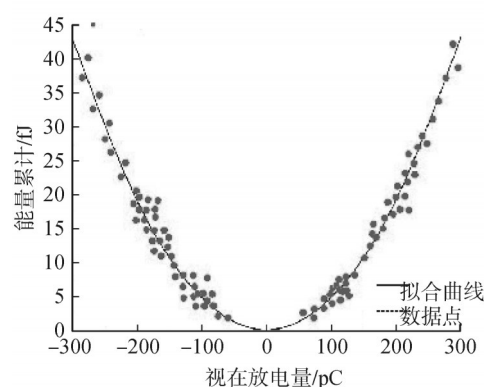
Fig. 11 The relationship between partial discharge and UHF signal peak voltage

$$K^2 = \frac{(\sum UQ - \frac{\sum U \sum Q}{N})^2}{[\sum U^2 - \frac{(\sum U)^2}{N}] [\sum Q^2 - \frac{(\sum Q)^2}{N}]} \quad (24)$$

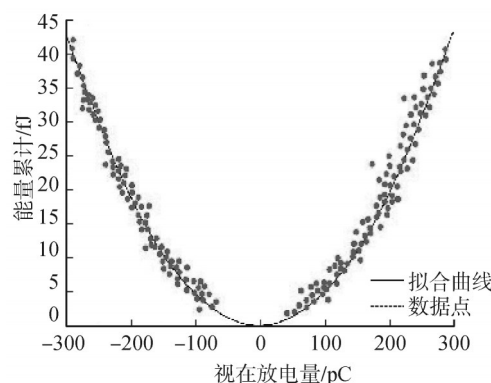
经验决定系数 K^2 可表征信号峰值电压 U 和视在放电电量 Q 线性相关性, K^2 越大线性相关性越好。可决系数 f_d 是指样本数据点聚集在拟合曲线周围相关程度的参量,表征信号能量和视在放电电量的二次拟合程度,同样 f_d 值越大拟合程度越好,反之越差。 w_i 是第 i 个数据点对应的权值,一般设为1, $\bar{Q}$ 为数据点的平均值, Q_i 为第 i 个数据点的拟合值; q_i 为第 i 个数据点的观测值。计算结果见表2。



(a) 轻微放电电量与UHF信号能量的关系



(b) 异常放电电量与UHF信号能量的关系



(c) 临界击穿放电电量与UHF信号能量的关系

图 12 放电电量与UHF信号能量的关系

Fig. 12 The relationship between the local discharge and UHF signal energy

表 2 经验决定系数(K^2)和可决系数(f_d)拟合程度评价比较Table 2 Comparison of the fitting empirical deciding coefficient degree (K^2) and resolvable coefficient degree (f_d)

拟合系数	轻微放电	异常放电	临界击穿
$K^2(U \text{ 和 } Q)$	0.954	0.960	0.946
$f_d(W_i \text{ 和 } Q)$	0.941	0.922	0.963

从图 11 可以看出 UHF 信号峰值电压与局部放电视在放电电量基本呈一次函数关系,且从表 2 经验决定系数 K^2 最小为 0.946,进一步证明 U 与 Q 线性相关性较好;从图 12 中可以看出 UHF 信号能量与放电电量之间的关系基本成二次曲线关系,且从可决系数 f_d 最小为 0.922 进一步得到了验证。上述数据验证

了利用 Friis 传输方程进行 GIS 局部放电定量计算的可行性与可靠性。

4 结论

文中通过 Friis 传输理论对 GIS 局部放电放电量与特高频接收信号之间关系的建模和计算, 得出了以下结论:

1) 通过将局部放电源等效为发射天线, 将计算简化为天线传输的计算;

2) 引入 Friis 传输方程, 能够有效地分析天线传输过程, 并得出 GIS 局部放电电视在放电量与接收天线接收的特高频信号电压峰值成一次函数关系, 与信号能量成二次曲线关系, 与实验结果相符。

参考文献:

- [1] 苑 舜. 高压开关设备状态监测与诊断技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
YUAN Shun. State monitoring and diagnosis technology of high voltage switchgear[M]. Beijing: China Machine Press, 2001.
- [2] 郭 俊, 吴广宁, 张血琴, 等. 局部放电检测技术的现状和发展[J]. 电工技术学报, 2005, 20(2): 29-35.
GUO Jun, WU Guangning, ZHANG Xueqin, et al. The actuality and perspective of partial discharge detection techniques[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(2): 29-35.
- [3] 蒋庆云, 张重远, 刘云鹏, 等. 检波技术在超高频 PD 信号提取中的应用研究[J]. 华北电力大学学报, 2006, 33(3): 10-13.
JIANG Qingyun, ZHANG Chongyuan, LIU Yunpeng, et al. Application of envelope detection technique to extraction of UHF PD signals[J]. Journal of North China Electric Power University, 2006, 33(3): 10-13.
- [4] 王永强, 李建芳, 李长元, 等. 检测 GIS 局部放电的小型化平面螺旋天线研究[J]. 高电压技术, 2016, 42(4): 1252-1258.
WANG Yongqiang, LI Jianfang, LI Changyuan, et al. Study on a miniaturized planar spiral antenna for partial discharge detection in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(4): 1252-1258.
- [5] 王 颂, 吴晓辉, 袁 鹏, 等. 局部放电超高频检测系统标定方法的研究现状及发展[J]. 高压电器, 2007, 43(1): 59-61.
WANG Song, WU Xiaohui, YUAN Peng, et al. Current situation and development of calibration for UHF-PD(partial discharge) detection system[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(1): 59-61.
- [6] CLEARY D P, JUDD M D. UHF and current pulse measurements of partial discharge activity in mineral oil[J]. IEEE Proceeding Measurement Technology, 2006, 153(2): 47-54.
- [7] OHTSUKA S, TESHIMA T, MATSUMOTO S, et al. Relationship between PD-induced electromagnetic wave measured with UHF method and charge quantity obtained by PD current waveform in model GIS[C]//Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Kansas City: IEEE, 2006: 615-618.
- [8] 唐 炬, 吴建蓉, 卓 然, 等. 针—板局部放电 VHF 信号与放电量之间的等量关系[J]. 高电压技术, 2010, 36(5): 1083-1089.
TANG Ju, WU Jianrong, ZHUO Ran, et al. Relationship between VHF signals and discharge magnitude of partial discharge from needle plate electrode[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(5): 1083-1089.
- [9] 张晓星, 唐俊忠, 唐 炬, 等. GIS 中典型局放缺陷的 UHF 信号与放电量的相关分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(1): 59-65.
ZHANG Xiaoxing, TANG Junzhong, TANG Ju, et al. Relationship between UHF signals and discharge magnitude from typical partial discharge defects in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(1): 59-65.
- [10] 钟顺时. 天线理论与技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
ZHONG Shunshi. Antenna theory and technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011.
- [11] 李 莉. 天线与电波传播[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
LI Li. Antenna and propagation[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [12] 王 颂, 李香龙, 李军浩, 等. 变压器局部放电超高频信号外传播特性的试验研究[J]. 高压电器, 2007, 43(2): 100-101.
WANG Song, LI Xianglong, LI Junhao, et al. Experimental study for outside propagation characteristic of the UHF signal emitted by partial discharge in transformers[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(2): 100-101.
- [13] 王 颂, 赵晓辉, 方晓明, 等. 变压器局部放电超高频信号的外部检测[J]. 高电压技术, 2007, 33(8): 88-91.
WANG Song, ZHAO Xiaohui, FANG Xiaoming, et al. UHF signal external detection of partial discharge in transformers[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(8): 88-91.
- [14] 邱昌容, 王乃庆. 电工设备局部放电及测试技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.
QIU Changrong, WANG Naiqing. Partial discharge and testing technology of electrical equipment[M]. Beijing: Beijing: China Machine Press, 1994.
- [15] 王国利, 郑 毅, 郝艳捧, 等. 用于变压器局部放电检测的超高频传感器的初步研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(4): 154-160.
WANG Guoli, ZHENG Yi, HAO Yanpeng, et al. Study on the Ultra-High-Frequency sensor for PD detection in power

- transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(4): 154-160.
- [16] 宋小弟,冯恩信,傅君眉,等. 分形天线工程及其新进展[J]. 无线通信技术,2008(2):48-54.
SONG Xiaodi, FENG Enxin, FU Junmei, et al. Fractal antenna engineering and its new progress[J]. Wireless Communication Technology, 2008(2): 48-54.
- [17] 殷立新. 分型阵列天线研究[D]. 西安:西安理工大学, 2010.
YAN Lixin. Fractal array antenna research[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2010.
- [18] 李明洋,刘敏,杨放. HFSS天线设计[M]. 北京:电子工业出版社,2011:19-74.
LI Mingyang, LIU Min, YANG Fang. Design of HFSS antenna [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011: 19-74.
- [19] 张微. GIS设备局部放电检测技术的试验研究[D]. 北京:华北电力大学,2012.
ZHANG Wei. Experimental study on partial discharge detection technology of GIS equipment[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [20] 律方成,金虎,王子建,等. 252 kV GIS局部放电实验仿真平台的设计[J]. 高压电器,2014,50(7):21-23.
LYU Fangcheng, JIN Hu, WANG Zijian, et al. Design of the 252 kV GIS partial discharge experimental simulation platform[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(7): 21-23.
- [21] 阮玲,高胜友,郑重,等. 宽带脉冲电流法局部放电检测方法的应用[J]. 高压电器,2009,45(5):80-83.
RUAN Ling, GAO Shengyou, ZHENG Zhong, et al. Pulse quantitative determination in partial discharge detection using wide bandwidth pulse current method[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(5): 80-83.
- 王永强(1975—),男,博士,副教授,硕导,从事电气设备绝缘在线监测与故障诊断系统等方面研究。
- 张斌(1993—),男,硕士,助理工程师,主要研究方向为电气设备状态监测与故障诊断。

(上接第20页)

- [20] 马爱清,陈吉,马文立. 基于APDL的750 kV变电站内分裂导线结构优化[J]. 电力系统自动化学报,2016,28(8):85-90.
MA Aiqing, CHEN Ji, MA Wenli. Structural optimization of split conductors in analysis on corona field of lines in 750 kV substation based on APDL[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(8): 85-90.
- [21] 110~750 kV 架空输电线路设计技术规范: QGDW_179—2008[S]. 2008.
Code of design 110~750 kV overhead transmission line: QGDW_179—2008[S]. 2008.
- 马爱清(1975—),女,博士,副教授,硕士生导师,从事高电压及其绝缘方面的研究、高压电气设备绝缘结构数值计算与结构优化、高压输电线路电磁环境数值分析等研究。
- 赵天成(1991—),男,硕士研究生,从事高电压及其绝缘方面的数值模拟研究。