

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.08.010

基于TDOA的变压器局放组合定位与监测天线优化布置方法研究

沙伟燕¹, 何宁辉¹, 张佩¹, 张方博²

(1. 国网宁夏电力有限公司电力科学研究院, 银川 750011; 2. 上海迈内能源科技有限公司, 上海 200241)

摘要: 变压器局部放电的准确检测对电力设备的状态评估与电网安全至关重要, 针对基于真型变压器的局部放电特高频信号传播特性研究较少, 少有学者细致剖析变压器内特高频信号所具有的传播特性, 文中首先对局部放电特高频电磁波传播特性与衰减特性进行了研究与分析, 同时提出了一种特高频局放定位方法, 即一种基于TDOA的UHF法变压器局放组合定位方法, 这些研究为监测天线优化提供了一定的理论基础。接着文中对Peano分形天线进行了研究, 同时设计了新的特高频油阀式天线, 然后通过变压器内布置多个局部放电源, 在箱体上合适位置布置多个Peano分形天线和特高频油阀式天线建立特高频监测天线优化布置模型, 经过分析可知仿真与实测信号的幅值和累积能量基本呈现出了较为一致的变化趋势, 说明了本建模方法的合理性, 为后续优化特高频天线的布置提供了模型基础与帮助。

关键词: 特高频; 局放定位; Peano分形天线; 特高频油阀式天线; 优化布置

Research on Optimization Layout for TDOA-based Combined Localization and Monitoring Antenna of Partial Discharge in Transformer

SHA Weiyan¹, HE Ninghui¹, ZHANG Pei¹, ZHANG Fangbo²

(1. State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd. Electric Power Science Research Institute, Yinchuan 750011, China;
2. Shanghai Mnai Energy Technology Co., Ltd., Shanghai 200241, China)

Abstract: The accurate detection of partial discharge in transformers is crucial for the state assessment of power equipment and the safety of the power grid. Research on the propagation characteristics of partial discharge of ultra-high frequency (UHF) signals based on full-scale transformers remains relatively limited, and few scholars thoroughly examine the UHF signal propagation behavior inside transformers. In this paper, the propagation and attenuation characteristics of partial discharge of the UHF electromagnetic waves is firstly studied and analyzed and, at the same time, a UHF-based partial discharge localization approach—specifically, a combined transformer partial discharge localization method utilizing the TDOA-based UHF technique, is proposed. These research efforts provide a theoretical basis for the optimal placement of monitoring antennas. Then, the Peano fractal antenna is studied and, at the same time, a new ultra-high frequency oil valve antenna is designed. After that, an optimized layout model for the ultra-high frequency monitoring antenna is set up by arranging multiple local discharge sources in the transformer and multiple Peano fractal antennas as well as ultra-high frequency oil valve antennas at appropriate positions on the box. It is found through analysis that both amplitude and accumulative energy of the simulated and measured signals exhibit a generally consistent trend, which demonstrates the effectiveness of the proposed modeling method and provides a model foundation and support for the subsequent optimization of UHF antenna placement.

Key words: ultra-high frequency; localization of partial discharge; Peano fractal antenna; ultra high frequency oil valve antenna; optimization layout

收稿日期:2026-02-14; 修回日期:2026-04-23

基金项目:国网宁夏电力有限公司科技项目(5229DK200047)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd.(5229DK200047).

0 引言

因为变压器的基本结构相对复杂,电磁波信号在实际传播期间,会受到来源于铁心、箱体等诸多因素的种种影响,这会让特高频信号的能量、传播时间等出现一定的改变,多样化传播路径对特高频信号所造成的影响程度显著,难以从该信号对应的检测结果上获得所需要的信息,正因如此,才很难对这类信号进行在线监测。针对这一问题,在运用特高频法对电力变压器进行日常局部放电检测的过程中,应当先掌握电磁波在变压器内部所表现出的传播特性,这是由于,其对改进天线安装位置、切实提升检测灵敏度、精准识别局部放电类型等方面,均有着不容忽视的关键作用,从而有助于特高频法很好应用于变压器中^[1-6]。

在过去研究过程中,当处于电磁波条件下,气体绝缘开关设备(GIS)所具有的传播特性正备受关注,即便部分学者围绕变压器内的特高频信号所表现出的传播特性展开了深入探究,但绝大多数研究均属于并不复杂的试验分析研究,亦或为一些仿真研究,而很少有学者以真型变压器为基础,围绕其中局部放电特高频信号所具有的传播特性展开细致剖析,对这方面的传播规律尚且没有清晰的认识,所以现如今特高频检测技术才无法在变压器中获得广泛应用^[7-9]。

变压器内部所选用的局部放电特高频检测法,主要基于精准测定特高频信号而实现,故而在较短时间内设计并且制造出能够接收相关特高频信号的传感器,将有助于局部放电检测环节的顺利。通常特高频传感器能够细分为两类:内置式和所谓的外置式,这两者依次处在变压器油箱内、外两大部位^[10-11]。前者因为隔绝了外部干扰源,所以才能够有效抵御诸多干扰,而且非常有灵敏度。后者则往往以接收接缝位置存在的衍射电磁波等形式而实现局部放电检测,这种方式的优势之处在于,不会直接影响到变压器的运行状态,而且安全性极佳。

对于特高频传感器而言,尤为关键的部分之一即为特高频天线,事实上,检测期间天线通常能够安装在油伐之内亦或为法兰盘表面。而在此之中,因为油伐空间比较局限,所以仅适合安装尺寸不大的天线。通常若天线结构想性能极佳,例如:增益相对较高、非常有灵敏度等,均应当扩大尺寸,而变压器当中存在的天线,尤其若需要处在油伐位置,则天线尺寸需要相对较小,故而,改进天线结构很有必要。当前时期,比较普遍的天线包含拉杆天

线^[12-13]等,然而,这些天线都必须平衡天线尺寸,也有一些性能上的不足之处。而其余类别的天线,例如:Hilbert分形天线^[14-15]、锥形天线^[16-17]、偶极子天线^[18-20]等。都有性能以及尺寸上的待优化之处,无法达到变压器在局部放电方面所提出的在线监测要求^[21-23]。

因此,文中先对局部放电特高频电磁波传播特性与衰减特性,以及特高频局放定位方法进行了理论研究,然后提出了变压器局放监测天线优化布置建模方法,最后通过仿真分析证明了其合理性,为后续优化特高频天线的布置提供了理论基础与模型基础。

1 局部放电特高频电磁波传播特性与衰减特性分析

中国范围内大部分处于工作状态的大型电力变压器油箱,在其箱体与顶盖、底座间均会以橡胶垫与螺栓相结合进行密封(ABB等公司所研发的全密封变压器不在其列),这时,变压器顶部亦或为底部会存在一圈非金属绝缘缝隙,与此同时,变压器中存在一定PD辐射的电磁波信号,也会由非金属绝缘逐步朝着外部进行泄漏传播,仅需精准测定泄漏的电磁波信号,即能够对大型电力变压器PD进行科学精准的在线监测。当前时期,即便该方式已达到了比较广泛的应用,然而,对电磁波处于缝隙内所表现的衰减特性等,还很少有学者展开相关研究,故而,应当对电磁波信号处于变压器缝隙之内所具有的传播特性展开相对全面的研究,为变压器特高频(UHF)监测天线优化布置提供一定的理论基础。变压器绝缘缝隙示意图见图1。



(a) 箱体和顶盖之间缝隙

(b) 箱体和底座之间缝隙

图1 变压器绝缘缝隙示意图

Fig. 1 Schematic diagram of transformer insulation gap

1.1 局部放电特高频电磁波传播特性

变压器当中存在一定PD辐射的电磁波信号,在借助缝隙逐步向外传播期间,会出现绕射以及衍射的情况。而因为有着缝隙边缘,所以电磁波在缝隙的入口位置与出口位置,会有边缘绕射的问题,除此之外,因为变压器缝隙的基本尺寸,趋向于电

磁波的实际波长,所以电磁波由变压器缝隙进行传播期间,还会出现衍射的问题^[7,24]。

1)边缘绕射。在电磁波所经过的传播路径方面,若有缝隙边沿,那么,电磁波信号将出现边缘绕射的情况,让电磁波不再保持本来的传播路径,反而会绕至几何阴影内。凯勒曾经提出边缘与边缘绕射射线、入射线彼此间存在的夹角等同。而入射线可激励相对较多的绕射射线,边缘绕射射线分布的圆锥面通常叫做凯勒圆锥^[25]。

2)基尔霍夫衍射理论。电磁波在实际传播期间,在经过缝隙亦或为小孔的情况下,将出现衍射的情况,而这会改变电磁波本来的传播方向。值得一提的是,经典的基尔霍夫理论^[26]可有助于深入探究电磁波衍射的问题。

该公式借助于边值来表示封闭区域范围内的标量场。如果假定无源封闭区域为 V ,同时,边界设定为 S ,那么,区域范围外的电流以及磁流源,在观察点 $P(r)$ 位置所形成的标量场便可定义为 ψ ,此时,标量场 ψ 遵循下述亥姆霍兹方程

$$\nabla^2 \psi(r) + k^2 \psi(r) = 0 \quad (1)$$

由格林第二定理,推导可得

$$\psi(r) = -\oint \frac{e^{jkR}}{4\pi R} \left[\nabla' \psi(r') + jk(1 + j\frac{1}{kR}) \frac{R}{R} \psi(r') \right] g e'_n dS' \quad (2)$$

在无限大屏面的中心位置存在某个小孔,体积 V_0 处于屏面所对应的右边空间,这时,边界条件如下: S_0 主要代表小孔孔面;而 S_1 主要表示无限大屏面; S_2 则代表半球面,其中, r' 属于 S_2 中的一点,如果假定坐标原点处于小孔中心位置,那么:

$$\psi(r') = f(\theta', \varphi') \frac{e^{jk r'}}{r'} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \psi(r')}{\partial r'} = (jk - \frac{1}{r'}) \psi(r') \quad (4)$$

将式(3)、(4)代入 $\psi(r)$ 方程可得

$$\left[\nabla' \psi(r') + jk(1 - j\frac{1}{k r'}) \frac{R}{R} \psi(r') \right] \cdot e' \approx 0 \quad (5)$$

故而,区域 V 范围内任意点 r 位置的场,均由 S_0 当中存在的次波源形成,以上 $\psi(r)$ 方程积分仅要在 S_0 中开展,得

$$\psi(r) = -\oint_{S_0} \frac{e^{jkR}}{4\pi R} \left[\nabla' \psi(r') + jk(1 + j\frac{1}{kR}) \frac{R}{R} \psi(r') \right] e'_n dS' \quad (6)$$

若屏右侧观察点相隔较远,则要综合考量远场衍射,以上公式能够进行如下简化

$$\psi(r) = -\frac{e^{-jkr}}{4\pi r} \oint_{S_0} e^{-jk r'} \left[e'_n \nabla' \psi(r') + jk e'_n \psi(r') \right] dS' \quad (7)$$

3)电磁波在变压器缝隙中的传播特征。缝隙入口位置出现的边缘绕射,会让电磁波不保持本来的

传播路径,此时,汇集点的电场强度会有所提高,详见图2。图2中,虚线代表电磁波本来的传播路径,蓝色线代表了衍射后的传播路径,点 O 代表了汇集点。

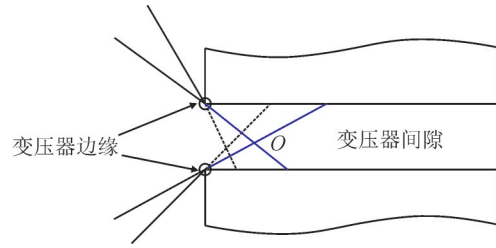


图2 电磁波入射变压器缝隙示意图

Fig. 2 Schematic diagram of electromagnetic wave incidenting transformer gap

电磁波在缝隙当中传播期间,因为缝隙壁会发挥一定的阻挡作用,所以电磁波会在缝隙当中的壁表面出现反射问题,在此期间,缝隙当中的信号强度会有所提高,同时,反射次数也会因为入射角的不断扩大而随之增长,除此之外,因为不可避免的会有一些的反射损耗,所以电磁波的强度在传播期间会存在不断衰减的情况,在没有顾及到电场泄漏问题时,电磁波衰减程度 SE 为

$$SE = 27.3 \frac{D}{H} + 20 \lg \frac{(1+k)^2}{4k} \quad (8)$$

式(8)中: D 、 H 为缝隙的深度与高度; k 为缝隙相对波阻抗。

电磁波入射变压器缝隙示意图见图3。在电磁波从起始的变压器缝隙逐步朝着外部自由空间进行传播的过程中,因为不存在一定的缝隙束缚,所以在电磁波反射环节完成后,绝大部分电磁波均会朝着本来的传播方向进行传播,此时,缝隙外的电场强度会迅速下降,而电磁波所出现的衍射情况等,会让一些电磁波偏离本来传播方向,从而减小信号强度。

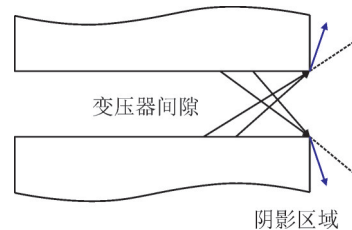


图3 电磁波入射变压器缝隙示意图

Fig. 3 Schematic diagram of electromagnetic wave incidenting transformer gap

1.2 特高频信号的衰减特性分析

高频信号衰减是一个很重要的概念,它表示传输的高频信号在传播过程中经历的衰减程度,通常以分贝(dB)为计量单位。高频信号的衰减程度与信号频率、传输介质、传输距离都有一定的关系。高

频信号的传输距离通常较短,因为高频信号会随着传输距离的增加逐渐衰减,这是由于传输介质的电磁波损耗和信号本身的自身损耗造成的。在传输介质方面,不同的介质对高频信号的衰减程度不同。比如,空气介质中高频信号衰减较小,而在金属介质中高频信号将会有很大的衰减^[27]。

在信号的频率方面,高频信号的传输距离受到一定的限制,因为高频信号的衰减程度较大。特高频信号的传输距离会更短。在一定范围内,高频信号的频率越高(特高频信号),衰减程度也越大,即信号的衰减程度与频率成正比。因此在高频信号的传输过程中要考虑信号频率对传输距离的影响。

特高频信号的衰减程度以分贝(dB)为计量单位,它是对信号功率的度量。当信号功率减少一半时,信号的衰减量为3 dB。

计算特高频信号的衰减量为

$$A = 20 \lg \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \quad (9)$$

式(9): A 为特高频信号的衰减量; P_1 为特高频信号的入射功率; P_2 为特高频信号的初设功率。

在计算特高频信号的衰减量时,需先确定信号的入射功率和出射功率。入射功率是指特高频信号通过传输介质进入接收端的功率,而出射功率是特高频信号从传输介质中传输到接收端的功率。通常情况下,我们可以测量特高频信号在传输介质上的传输损耗来计算信号的出射功率。

特高频信号的衰减是影响信号传输质量和距离的重要因素之一。通过使用适合的计算公式,可以计算出特高频信号的衰减量,从而为设计和优化特高频信号天线系统提供帮助。

2 基于TDOA的UHF法变压器局放组合定位方法

在中国大电网中,变压器作为重要的配网设备,其平稳安全运行至关重要,然而局部放电PD会直接导致了变压器出现绝缘劣化问题,如未及时发现并检修,将加快变压器老化,导致绝缘击穿的重大电力事故。从相关研究可知,变压器的绝缘劣化不仅关系到放电量等因素,而且关联着放电位置。采用局部放电定位的方式,会较为精准的发现变压器的绝缘状态,以便制定较为高效的检修策略。

特高频法(UHF)能够进行精准的局放检测,在变压器等相关设备的局放检测当中备受瞩目。目前,以UHF定位为研究对象有两种常见方法:基于到达时间差(TDOA)和基于信号接收幅值强度

(RSSI)。前者布置了特高频传感器阵列,结合相关信号到这一阵列经过的时间差,依托于相关方法得到局放源的坐标。该方式能够达到比较好的定位效果^[28],而相比之下,后者能够有效抵御诸多干扰,现如今,可移动式定位装置已经存在于变电站中,但是其必须有高速同步采样设备的协助才能实施。中国曾有研究者在变压器中设定了特高频传感器阵列,并且结合复数域牛顿迭代算法等进行计算,得到绕组内存在的单源局放,最后所得精度仅为0.34 m。2003年,Philip J. Moore曾经汇总变电站一些比较普遍的局放空间电磁波频谱特性,并且指出可利用天线阵列,对一些开放空间开展局放定位。

本节针对变压器局放故障定位,通过一定方式布置特高频智能感知传感器采集局放UHF信号并进行去噪处理,然后对UHF信号进行到达时差筛选得到较为精确的时差组,接着分别对其一边利用3 δ -Two step算法与Taylor迭代算法求解局放源坐标 O_1 ,同时另一边利用三角质心定位算法计算出局放源坐标 O_2 ,然后设置一个阈值 ε ,并判断 O_1 、 O_2 的偏差 ϕ ,最后取二者加权均值作为局放源坐标。鉴于此提出了一种基于TDOA的组合局放定位方法。本方法能够较准确的定位出变压器局放源的位置坐标。文中方法的步骤如下(见图4):

步骤1),局放UHF信号采集与去噪处理。

步骤2),对UHF信号进行TDOA筛选,得到较为精确的时差组。

步骤3),利用3 δ -Two step算法聚类分离输出时差中心,然后根据Taylor迭代算法求解局放源坐标 O_1 。

步骤4),利用三角质心定位算法计算定位坐标,作为局放源坐标 O_2 。

步骤5),计算 $\phi = \|O_1 - O_2\|$,并判断是否 $\phi \leq \varepsilon$,如果是,则进行下一步,如果否则返回执行步骤2)。

步骤6),输出最终局放源坐标 $O = (k_1 O_1 + k_2 O_2)/2$ 。

本方法中以正方形方位布置4个特高频智能感知传感器采集局放UHF信号,接着利用小波阈值去噪法对局放UHF信号进行去噪处理,然后对去噪后的局放UHF信号进行归一化处理,以加快运算速。归一化公式为

$$y_i = \frac{x_i}{\sum x_i} \quad (10)$$

对UHF信号进行TDOA筛选。以变压器一端底部为原点(0,0,0)建立空间直角坐标系,局放源以 $P(x, y, z)$ 表示,各个特高频智能感知传感器分别以

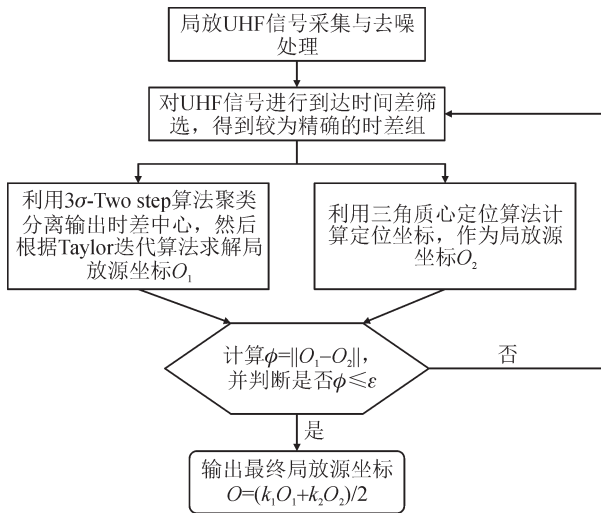


图4 变压器局放定位算法流程图

Fig. 4 Flow chart of transformer partial discharge positioning algorithm

$S_1(x_1, y_1, z_1)$ 、 $S_2(x_2, y_2, z_2)$ 、 $S_3(x_3, y_3, z_3)$ 、 $S_4(x_4, y_4, z_4)$ 表示, 由此建立球面方程组数学模型:

$$(x-x_1)^2+(y-y_1)^2+(z-z_1)^2=(\nu T)^2 \quad (11)$$

$$(x-x_2)^2+(y-y_2)^2+(z-z_2)^2=\nu(T+\tau_{21})^2 \quad (12)$$

$$(x-x_3)^2+(y-y_3)^2+(z-z_3)^2=\nu(T+\tau_{31})^2 \quad (13)$$

$$(x-x_4)^2+(y-y_4)^2+(z-z_4)^2=\nu(T+\tau_{41})^2 \quad (14)$$

式(11)-(14)中: T 为参考特高频智能感知传感器 S_1 接收信号所需时间; $\tau_{i1} = T_i - T$ 为 S_i 特高频智能感知传感器与 S_1 特高频智能感知传感器接收到局放信号波形的时差, T_i 为 S_i 特高频智能感知传感器接收到信号所需时间($i=2, 3, 4$); ν 为等值波速。

利用广义互相关方法估计 TDOA, 然后进行基于球面方程组的 TDOA 筛选, 用以剔除其中估计误差较大的时差。利用 3δ -Two step 算法聚类分离输出时差中心, 首先利用 Two step 算法输出各个时差组的数据及中心, 然后以聚类中心为均值, 求取标准差, 分别筛选每个时差组中 $[\mu_1 \pm \delta_1, \mu_2 \pm \delta_2]$ 区间的数据, 接着根据偏度和峰度检验其正态性是否满足设定水平, 最后输出筛选各时差组的均值作为聚类中心。

一方面, 根据 Taylor 迭代算法求解局放源坐标 O_1 , Taylor 级数展开法是一种迭代算法, 在 Taylor 级数展开的基础上, 利用初始迭代值进行 WLS 估计, 再计算位置估计误差所对应的局部最小二乘解, 然后, 更新局放源。Taylor 算法应当先得到标签位置所对应的初始估计值, 而后持续迭代, 以此不断逼近局放源所对应的位置坐标 O_1 。另一方面利用三角质心定位算法计算定位坐标作为局放坐标 O_2 。三角质心定位算法的大致步骤为: ①建立路径损失

模型; ②利用线性回归算法得到 A 和 n ; ③定位锚点接收一组 $RSSI$ 值; ④对接受的 $RSSI$ 值进行滤波; ⑤由 3 个锚点得出局放位置坐标。路径损耗模型: 高频信号在传播过程中会出现衰减, 且随着距离的增加其衰减程度会逐渐加深。故基于 $RSSI$ 与距离存在一定的函数关系, 可用对数距离路径损耗模型表示

$$RSSI = P_L(d) = P_L(d_0) - 10n \lg\left(\frac{d}{d_0}\right) + \varepsilon \quad (15)$$

式(15)中: d 为锚点与终端设备之间的距离; $P_L(d_0)$ 为 $d_0=1$ 时, $RSSI$ 的值可简化为 $A = P_L(d_0)$; n 为路径损失比例系数; ε 为随着距离的增加, 信号的损失程度, 其与定位环境有关。根据式(15)可求出

$$d = 10^{\frac{(A-RSSI)}{n}} \quad (16)$$

三角质心定位算法是常用基于测距的算法, 实施方式为: 由于信号的损耗, 3 个圆一般不会相交于一点, 连接 2 个圆的圆心以及 2 个圆的交点、两条直线的交点即为策略点, 则 3 个圆会得到 3 个策略点, 策略点连线为 1 个三角形的区域, 该区域的质心即为要求得的待定位点的坐标位置。

最终设置偏差阈值 $\varepsilon = 0.3 \text{ m}$ 。计算 $\phi = \|O_1 - O_2\|$, 并输出最终局放源坐标

$$O = (k_1 O_1 + k_2 O_2) / 2 \quad (17)$$

式(17)中, k_1 、 k_2 为权数, 可由经验赋值, 取 $k_1 = 0.6$, $k_2 = 0.4$ 。

本节方法通过组合定位算法对局放源进行定位, 并通过设置偏差阈值 ε 来反复优筛时差组, 最终取两种局放源定位位置的加权均值作为最终的局放源定位坐标。本方法中偏差阈值 ε 可凭针对设备类型和经验确定, 本方法可以显著提高特高频局放源定位的精度。

3 变压器特高频局放监测天线优化布置建模方法研究

特高频天线是换流变压器局部放电特高频在线监测方法的关键技术, 其性能关系到局部放电特高频信号能否成功提取并进行处理。因为该信号的能量频带主要集中于 $0.3 \sim 1 \text{ GHz}$ 之间, 这要求特高频天线在这一频带内有尽可能宽的频带; 由于中国多数用户使用的移动通讯信号频率为 900 MHz , 因此要求特高频天线在该频率处的驻波比较大, 甚至能够不接收移动通讯无线电窄带周期干扰信号; 此外, 当前用于局部放电监测的宽带特高频天线尺寸普遍较大, 难以安装于换流变压器进行局部放电

在线监测,若减小局部放电特高频天线的尺寸,其频带将不可避免地变窄。分形天线能够在保证宽频带的前提下尽可能地减小天线的尺寸,同时其具有多个频带,对其进行优化设计能够避免接收移动通信无线电窄带周期干扰信号,提高局部放电特高频监测的灵敏度^[29]。

3.1 Peano 分形天线

1~3阶Peano分形曲线见图5。外围尺寸为 l ,各类导线长度均为 d 的 n 阶Hilbert和Peano分形天线,其导线总长度 L 为^[30]

$$\begin{cases} d = \frac{l}{3^n - 1} \\ L = (3^{2n} - 1)d = (3^n + 1)l \end{cases} \quad (18)$$

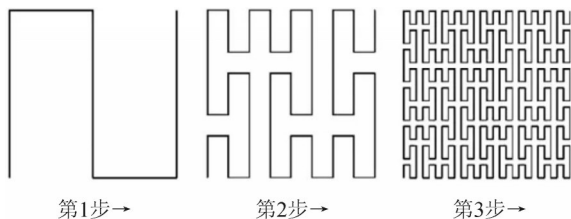


图5 1~3阶Peano分形曲线

Fig. 5 1-3th order Peano fractal curve

谐振频率是分形天线特性中的重要参数,其几何参数的设置将影响天线的谐振频率。在计算Peano分形天线的谐振频率时,天线被细致划分为3大部分,其中包含了短路终端,详见图6。

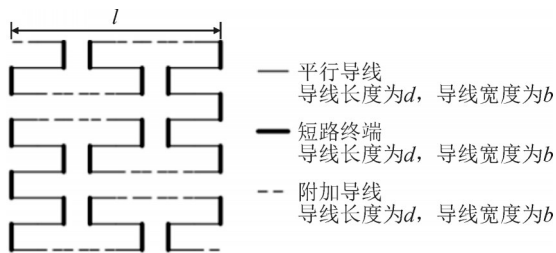


图6 Peano分形天线组成示意图

Fig. 6 Schematic diagram of Peano fractal antenna composition

文中从应用的角度出发,对3阶Peano分形天线进行了仿真计算,并得到经过优化的3阶Peano分形天线,其参数为 $l=100\text{ mm}$, $d=3\text{ mm}$, $b=3\text{ mm}$ 。

3.2 特高频监测天线优化布置模型

基于时域有限积分算法^[31],采用CST Microwave Studio仿真软件,根据真型变压器结构尺寸,建立变压器局部放电电磁传播仿真模型。采用间隙馈电法建立特高频天线的仿真模型,实现局部放电特高频信号波形的准确计算。通过在变压器内布置多个局部放电源,根据特高频信号的传播与衰减特性以及现场经验在箱体上合适位置布置多个Peano分形天线和特高频油阀式天线建立特高频监测天线优化布置模型,见图7。具体如下:

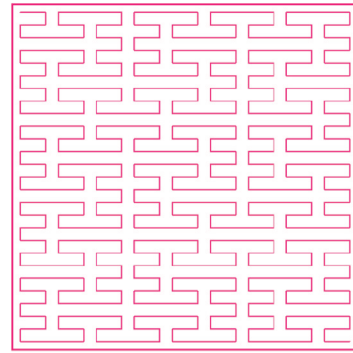


图7 3阶Peano分形天线的仿真模型

Fig. 7 Simulation model of third order Peano fractal antenna

为了验证对于变压器来说仿真建模是否有效的问题。首先,应先构建充油变压器所对应的特高频检测平台,此时,变压器的基本尺寸与天线所在处,详见图8,其尺寸为:1 800 mm×820 mm×1 650 mm,在箱体的上边方位存在某直径等于100 mm的孔,由这一孔即能够将单极子天线当做为电磁波源。而箱体侧面依次存在2个DN80与1个DN50的油阀,基本示意图详见图8(a),所有油阀当中均能够安装某性能优良的油阀式天线;其次文中选用油阀式特高频传感器见图9。传感器天线位于变压器内部,天线接收信号更灵敏,而且可以有效的排除外部信号干扰,使检测结果更准确。油阀式天线位于图8中A-C位置处,天线探头在箱体中的深度等于50 mm,为了让检测更加灵敏。文中于箱体顶部选择了5处,详见图8(b),能够在D-H处安装Peano分形天线。再将实际长度等于18 mm的单极子天线放于A、B两相间的绝缘支柱当中。电压脉冲发生器(LDC-7/UHF)以2 100 mm的50 Ω同轴电缆紧密衔接于单极子天线,与此同时,将60 V高频阶跃电压信号作用于该天线中,即能够激发出相对稳定的电磁波。除此之外,示波器主要负责采集并且存储由特高频天线所检测出的信号。

文中三相变压器^[32]包含了箱体、低压绕组、引线等相关部分,其中,绕组属于较典型的层式圆筒型结构,单相绕组内包含的高压(HV)、低压(LV)圆筒形线圈依次为4、2层,其中线圈直径的极小值与极大值依次为207、350 mm,而实际高度等于780 mm,两类线圈依次由156、57匝导线构成,而匝间为实际厚度大约等于0.3 mm的绝缘纸。变压器仿真模型中用到材料的典型特性数据见表1。

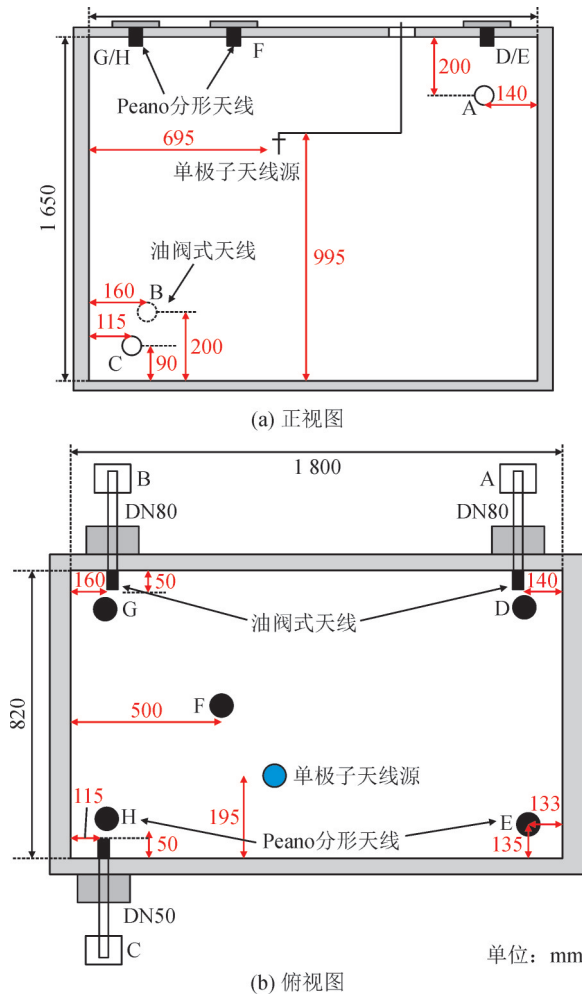


图8 天线安装位置图

Fig. 8 Schematic diagram of antenna installation position

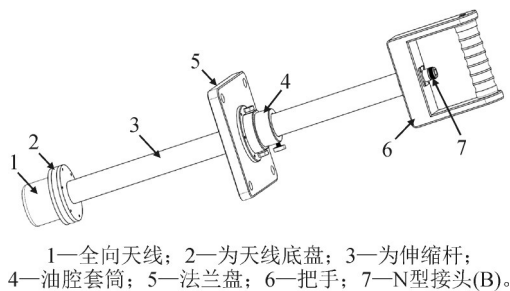


图9 特高频油阀式天线

Fig. 9 Ultra high frequency oil valve antenna

表1 变压器仿真模型中用到材料的典型特性

Table 1 Typical characteristics of materials used in transformer simulation models

材料	相对介电常数	电导率/($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$)	相对磁导率
空气	1.0	0.0	1
铜(绕组模型)	$-\infty$	6.0×10^7	1
油浸纸板	3.9	1.0×10^{-14}	1
硅钢片(铁心)	$-\infty$	1.0×10^5	6 000
铜(箱体)	$-\infty$	5.0×10^5	500
天线(理想电导体)	—	∞	—

在CST中得到的变压器3D仿真计算模型,在尺

寸上和实物完全一致,为有效降低不必要的仿真求解时间,文中简化了模型,不关注引线等结构,并且将各层绕组线圈当做导电圆柱体,这能明显减少网格数量,而且比较合理。这是由于,变压器绕组属于非常典型的圆筒形结构,而导线匝间属于实际厚度等于0.3 mm的绝缘纸,正因如此,电磁波衰减显著,所以很难由试验检测出经过了匝间绝缘的电磁波^[33]。将长度等于20 mm的单极子天线放于A、B这两相间所存在的绝缘支柱中,可知得到的位置坐标完全相同于试验结果。此时,馈电间隙等于0.5 mm,为电压型。同时,端口电压属于阶跃电压,波形幅值等于60 V,而上升时间等于0.4 ns。此外,介质窗式、油阀式两类接收天线依次处于箱体顶部与侧部,两者对应的位置坐标完全一致于试验结果。而接收天线端口阻抗等于50 Ω ,可以精准测定端口所对应的电压波形。而表1还提及到了材料电导率等参数。在仿真期间,文中运用到了六面体网格,频率处于0~1.8 GHz的区间中,所有的波长区间均含有35个网格,累计有78 000 000个网格,仿真波形可持续100 ns,材料类型也为正常。

然后,文中对各检测处的Peano天线与油阀式天线的两大结果展开了细致对比,详见图10、11。

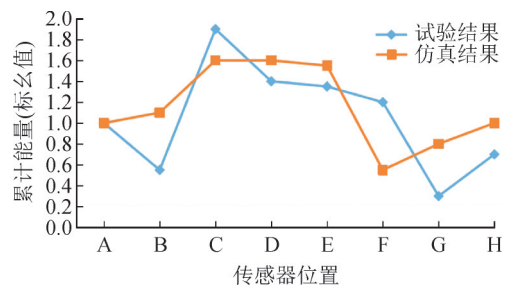


图10 变压器中实测和仿真的特高频信号幅值对比

Fig. 10 Comparison of measured and simulated ultra high frequency signal amplitude in transformer

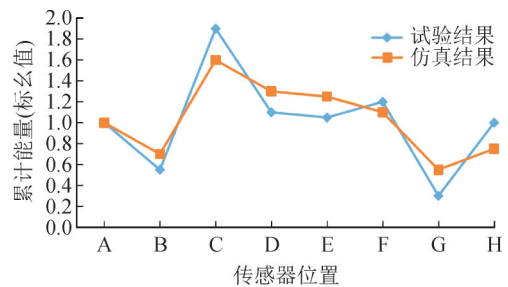


图11 变压器中实测和仿真的特高频信号能量对比

Fig. 11 Comparison of measured and simulated ultra high frequency signal energy in transformer

为方便进行对比,文中将所有检测位置信号的幅值和位置A对应的信号幅值之间相除,再对其进行标准化处理,这样便可以获得标么值。由图10、11可知,仿真、实测信号对应的幅值与累积能量的

趋势均大体相同。这说明了本模型的合理性,为优化特高频天线的优化布置提供了模型基础与帮助。

4 结论

1)通过对电磁波信号在变压器缝隙中的传播特性研究以及对衰减特性的分析可知特高频信号在变压器缝隙中传播不仅发生了绕射同时还会发生衍射;特高频信号能量的衰减跟信号频率、传输介质、传输距离都有一定的关系,且跟信号频率和距离成正比。特高频信号的衰减是影响信号传输质量和距离的重要因素之一,通过使用适合的计算公式,可以计算出特高频信号的衰减量,从而为设计和优化特高频高频信号天线系统提供帮助。

2)通过对变压器特高频相关理论的研究,文中提出了一种基于TDOA的UHF法变压器局放组合定位方法。本方法通过两种方式对局放源进行定位,并通过设置偏差阈值 ε 来反复选优筛选时差组,最终取两种局放源定位位置的加权均值作为局放源定位坐标。本方法中偏差阈值 ε 可凭针对设备类型和经验确定,本方法可以明显提高局放源定位的精度。

3)针对当前用于局部放电监测的宽带特高频天线尺寸普遍较大,难以安装于换流变压器进行局部放电在线监测的问题,文中通过对Peano分形天线的研究发现,分形天线能够在保证宽频带的前提下尽可能地减小天线的尺寸,同时其具有多个频带,对其进行优化设计能够避免接收移动通讯无线电窄带周期干扰信号,提高局部放电特高频监测的灵敏度。同时设计了新的特高频油阀式天线,通过在变压器内布置多个局部放电源,在箱体上合适位置布置多个Peano分形天线和特高频油阀式天线建立特高频监测天线优化布置模型,经过分析可知仿真与实测信号的幅值和累积能量基本呈现出了较为一致的变化趋势,说明了本建模方法的合理性,为后续优化特高频天线的布置提供了模型基础与帮助。

参考文献:

- [1] 郭文骏,王臻龙,赵湘文,等.油浸式配电变压器局部放电检测技术及模式识别综述[J].广东电力,2023,36(5):67-78.
Guo Wenjun, Wang Zhenlong, Zhao Xiangwen, et al. Review of partial discharge detection technology and pattern recognition of oil-immersed distribution transformer[J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(5): 67-78.
- [2] 梁栋,朱建华,张翠,等.变压器状态评估及故障诊断研究综述[J].变压器,2024,61(2):35-43.
Liang Dong, Zhu Jianhua, Zhang Cui, et al. Review of transformer

- condition assessment and fault diagnosis[J]. Transformer, 2024, 61(2): 35-43.
- [3] 孟建英.基于大数据分析技术的电力设备局部放电宽频检测方法[J].电子设计工程,2025,33(17):141-144.
Meng Jianying. Broadband detection method for partial discharge in power equipment based on big data analysis technology[J]. Electronic Design Engineering, 2025, 33(17): 141-144.
- [4] 吴琼,李鸣,高方玉,等.配电变压器数字孪生体构建技术研究[J].供用电,2024,41(1):42-49.
Wu Qiong, Li Ming, Gao Fangyu, et al. Research on digital twin construction technology of distribution transformer[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(1): 42-49.
- [5] 黄莉娜,齐金鹏,戴理,等.基于特征提取和AHC的变压器数据异常检测方法[J].电力科学与技术学报,2025,40(5):14-23.
Huang Lina, Qi Jinpeng, Dai Li, et al. Transformer data anomaly detection method based on feature extraction and AHC[J]. Journal of Electric Power Science And Technology, 2025, 40(5): 14-23.
- [6] 侯赛,成润坤,刘达.基于二次采样和集成学习方法的变压器故障预测[J].智慧电力,2024,52(7):40-47.
Hou Sai, Cheng Runkun, Liu Da. Transformer fault forecast based on re-sampling and integrated learning approach[J]. Smart Power, 2024, 52(7): 40-47.
- [7] 张国治.大型电力变压器缝隙泄漏电磁波局放特高频检测技术研究[D].武汉:武汉大学,2019.
Zhang Guozhi. Research on ultra high frequency detection technology of slot leakage electromagnetic wave partial discharge of large power transformer[D]. Wuhan: Wuhan University, 2019.
- [8] 刘振宇,罗日成,俞乾,等.基于高阶累积量的变压器多局放源定位算法研究[J].变压器,2024,61(5):58-64.
Liu Zhenyu, Luo Richeng, Yu Qian, et al. Research on multi-partial discharge source location algorithm of transformer based on high-order cumulant[J]. Transformer, 2024, 61(5): 58-64.
- [9] 周萱,吴伟丽.基于改进SMOTE不均样本处理和IHPO-DBN的变压器故障诊断方法研究[J].电力系统保护与控制,2024,52(11):21-30.
Zhou Xuan, Wu Weili. Transformer fault diagnosis method based on improved SMOTE unbalanced sample processing and IHPO-DBN[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(11): 21-30.
- [10] 何龙,朱咏明,马金财,等.基于PCP和改进CNN的变压器内外故障诊断方法研究[J].电力电容器与无功补偿,2025,46(2):106-119.
He Long, Zhu Yongming, Ma Jincai, et al. Research on fault diagnosis method inside and outside transformer based on PCP and improved CNN[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(2): 106-119.
- [11] Suo Chunguang, Zhao Jingjing, Wu Xuehua, et al. Partial discharge detection technology for switchgear based on near-field detection[J]. Electronics, 2023, 12(2): 336.
- [12] De Andrade Lira R V, De Siqueira Campos A L P, Neto A G, et al. Elliptical UHF sensor for partial discharge detection[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2022(348): 113981.
- [13] 徐晓刚,侯春光,陈正擎.基于超高频和声学成像联合检测的开关柜局部放电研究[J].电器与能效管理技术,2023(4):34-39.

- Xu Xiaogang, Hou Chunguang, Chen Zhengqing. Research on partial discharge of switchgear based on UHF and acoustic imaging joint detection[J]. *Electrical & Energy Management Technology*, 2023(4):34-39.
- [14] 王小朋,王艳华,牛丽丽,等. 特高频检测技术在开关柜局部放电诊断中的应用[J]. *电工技术*, 2022(21):161-163.
- Wang Xiaopeng, Wang Yanhua, Niu Lili, et al. Application of UHF detection technology in partial discharge diagnosis of switchgears[J]. *Electric Engineering*, 2022 (21): 161-163.
- [15] Sinaga H H, Phung B T, Blackburn T R. Partial discharge localization in transformers using UHF detection method[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2012, 19(6): 1934-1940.
- [16] 霍上元,李丹丹,王 磊,等. 变压器出线装置内部支撑结构的优化[J]. *变压器*, 2024, 61(3):1-9.
- Huo Shangyuan, Li Dandan, Wang Lei, et al. Optimization of internal support structure of transformer outlet device[J]. *Transformer*, 2024, 61(3):1-9.
- [17] 鲁 创,任 萍. 电力电缆局放检测的超高频传感器天线设计[J]. *船电技术*, 2022, 42(12):11-16.
- Lu Chuang, Ren Ping. Design of UHF sensor antenna for partial discharge detection of power cable[J]. *Marine Electric & Electronic Technology*, 2022, 42(12):11-16.
- [18] 李文虎. 集成 HF 和 UHF 的双频无源 RFID 传感器技术研究[D]. 天津:河北工业大学, 2021.
- Li Wenhui. Research on Integrated HF and UHF dual-band passive RFID sensor technology[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2021.
- [19] Kameli S M. Design and optimization of UHF partial discharge sensors using FDTD modeling[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(1): 127-133.
- [20] 蔡 黎,袁文泽,张轩瑞,等. 基于特高频自感知的变压器局部放电检测方法[J]. *高电压技术*, 2021, 47(6):2041-2050.
- Cai Yun, Yuan Wenze, Zhang Xuanrui, et al. Ultra-high frequency self-sensing detection method for transformer partial discharge[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(6):2041-2050.
- [21] Kenji S, Tetsuo S, Hiroshi K, et al. Upgrade of ICRF antennas by utilizing impedance transformers in LHD[J]. *Plasma and Fusion Research*, 2022(17):2405009.
- [22] Jahangir H, Akbari A, Azirani M A, et al. Turret-electrode antenna for UHF PD measurement in power transformers-part I: introduction and design[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2020, 27(6):2113-2121.
- [23] 李贤良,唐毅博,詹江杨,等. 光纤光栅传感器在变压器多参量智能监测中的应用研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(6):154-160.
- Li Xianliang, Tang Yibo, Zhan Jiangyang, et al. Application of a fiber Bragg grating sensor in multi parameter intelligent monitoring of a transformer[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(6):154-160.
- [24] 尹奎龙,任社宜,任 炜. 电力变压器局部放电超高频电磁波产生机理及传输特性研究[J]. *电工技术*, 2021(3):117-119.
- Yin Kuilong, Ren Sheyi, Ren Wei. Study on generation mechanism and transmission characteristics of UHF electromagnetic wave in partial discharge of power transformer[J]. *Electric Engineering*, 2021(3):117-119.
- [25] Abgaryan G V, Shestopalov Y V. Te - polarized electromagnetic wave diffraction by a circular slotted cylinder[J]. *Mathematics*, 2023, 11(9):1-16.
- [26] 孙森山. 电磁波衍射效应及其增强定向来波接收“视角”的应用[D]. 西安:西安电子科技大学, 2022.
- Sun Senshan. Electromagnetic wave diffraction effect and its application in enhancing the ‘viewing angle’ of directional incoming wave reception[D]. Xi'an: Xidian University, 2022.
- [27] 张 超,孔晓玉,郑丹丹. 带电介质板对电磁波的衰减特性研究[J]. *电子技术应用*, 2022, 48(1):152-156.
- Zhang Chao, Kong Xiaoyu, Zheng Dandan. Study on the scattering characteristics of electromagnetic wave with dielectric band[J]. *Application of Electronic Technique*, 2022, 48(1):152-156.
- [28] 李继明,张建辉,王晓涵,等. 改进的鲸鱼优化算法与泰勒级数相结合的井下 TDOA 定位方法[J]. *实验技术与管理*, 2022, 39(12):30-36.
- Li Jiming, Zhang Jianhui, Wang Xiaohan, et al. Downhole TDOA positioning method with improved whale optimization algorithm and Taylor series[J]. *Experimental Technology and Management*, 2022, 39(12):30-36.
- [29] 陈浩敏,姚森敬,辛文成,等. 局部放电信号特高频检测对数周期天线优化设计[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2022, 20(7):684-690.
- Chen Haomin, Yao Senjing, Xin Wencheng, et al. Optimal design of logarithmic periodic antenna for UHF detection of partial discharge signal[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2022, 20(7):684-690.
- [30] 黄文锐,王 俊. 一种基于双 Peano 分形的小型天线设计及分析[J]. *价值工程*, 2020, 39(21):197-199.
- Huang Wenrui, Wang Jun. The design and analysis on small-scale receiving antenna based on double-Peano fractal[J]. *Value Engineering*, 2020, 39(21):197-199.
- [31] 邱 浩,王曙鸿,孙凤举,等. 基于时域有限积分技术的四级串联快脉冲直线型变压器驱动源电磁特性[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(4):816-826.
- Qiu Hao, Wang Shuhong, Sun Fengju, et al. The electromagnetic characteristics of the four-stage series-connected fast linear transformer driver based on time-domain finite integration technique[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(4):816-826.
- [32] 樊战亭. 基于 Simulink 的三相变压器连接组别仿真与分析[J]. *价值工程*, 2022, 41(31):148-151.
- Fan Zhanting. Simulation and analysis of three phase transformer connection group based on Simulink[J]. *Value Engineering*, 2022, 41(31):148-151.
- [33] 谷 雨. 超高频局放监测用天线设计及试验研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2022.
- Gu Yu. Design and experimental study of antenna for super high frequency partial discharge monitoring[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2022.
- 沙伟燕(1983—),女,高级工程师,研究方向为高电压与绝缘技术(通信作者)(E-mail:247448539@qq.com)。