

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.04.022

开关柜局部放电定位及放电源信号参数评估研究

郑建康¹, 杨晓宇¹, 孙浩杰², 李洪杰², 朱孟鑫², 朱春阳², 卫 勃²

(1. 国网西安供电公司, 西安 710032; 2. 西安交通大学, 西安 710049)

摘要: 文中的工作为开关柜局放源的精确定位提供了理论基础, 弥补了TEV法受测试位置影响较大的不足。研究了采用四通道传感器对开关柜局部放电进行精确定位的方法。研究表明利用双曲面法和空间网格搜索法能够实现对放电源的精确定位。基于精确定位结果, 文中采用模拟退火算法及FDTD组合算法研究了放电源脉冲等效电流峰值 I_0 和局部放电脉宽 τ 的优化评估问题, 从而为准确反映放电源的实际强度和有效评估开关柜绝缘状态提供了理论依据和新思路。

关键词: 10 kV开关柜; 暂态对地电压; 精确定位; 参数评估

Research on Location Method and Parameter Estimation of PD Signal for Metal-clad Switchgear

ZHENG Jiankang¹, YANG Xiaoyu¹, SUN Haojie², LI Hongjie²,
ZHU Mengxin² ZHU Chunyang², WEI Bo²

(1. State Grid Xi'an Electric Power Supply Bureau Co., Ltd., Xi'an 710032, China;
2. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The results of this paper provide the theoretic foundation for locating partial discharge source precisely and makes up for the shortage of TEV. Finite-difference time-domain method (FDTD) is used to simulate the TEV signal on switchgear and precise location method is studied with four channel detection system. Research shows that using hyperboloid method and spatial grid search method can locate the PD source precisely. Furthermore, an optimization method which is used to estimate the equivalent pulse width and amplitude of Gaussian pulse source for simulating PD of switchgear is presented by combining the simulated annealing algorithm with the FDTD method. It can provide theoretical basis for calculating the real intensity of PD signal and switchgear insulation condition assess accurately with a new perspective.

Key words: 10 kV switchgear; TEV; precise location method; parameter estimation

0 引言

开关柜是配网系统中重要的基本单元, 直接关系到配电的质量和可靠性, 因此对其进行绝缘状态监测意义重大。而局部放电的程度是评估设备绝缘状态的重要依据^[1-2]。目前, 在实践中应用比较广泛的是用暂态对地电压(transiant earth voltage, TEV)法对开关柜进行带电局部放电监测^[3-4]。

由于电磁波在传播过程中存在衰减, 因此开关

柜表面的 TEV 幅值不仅和局部放电源的放电强度有关, 还与放电信号的传播路径等因素有关^[5]。放电源空间位置可以通过多传感器进行精确定位, 而放电源的脉冲参数则可以在开关柜结构已知的情況下通过多传感器采集开关柜表面的 TEV 波形进行评估, 进而精确地确定放电源的放电强度, 这对实际判断开关柜绝缘状态具有重要指导意义。

针对于此, 文中对多传感器开关柜精确定位方法进行了研究, 并基于定位结果结合测得的 TEV 信号, 对放电源脉冲的参数评估进行了探索。

1 TEV 检测方法和 FDTD 仿真介绍

高压开关柜内部发生局部放电时,会产生高频电磁波,而高频电磁波传播过程中会在柜体表面产生一个暂态对地电压(TEV)。检测该 TEV 信号就能获知局部放电的相关信息^[6]。

目前有相当多的文献运用时域有限差分法(finite-difference time-domain, FDTD)对高压开关柜内部局部放电的特性进行了仿真研究。FDTD 法通过把需要计算的空间域剖分成一定形式的网格,将时域微分方程用有限差分方程组代替,将时间离散化后,加上边界条件和初始条件,就可以按照时间步进法求解^[7]。

2 局部放电精确定位方法

采用多传感器在开关柜外表面进行 TEV 局放信号监测,可以通过计算传感器接收信号之间的到达时间差对某隔室内部的局放信号的位置进行精确评估^[8-10]。文中对 4 个传感器的情况进行了研究。

2.1 双曲面定位法

图 1 为开关柜局放定位示意图,以某隔室左下角为坐标原点,建立空间直角坐标系。设局部放电源 $P(x, y, z)$ 到传感器 $S_i(x_i, y_i, z_i)$ ($i=1, 2, 3, 4$) 的传播时间为 t_i , 则有

$$t_i = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} / c. \quad (1)$$

式(1)中, c 为光速, 3×10^8 m/s。

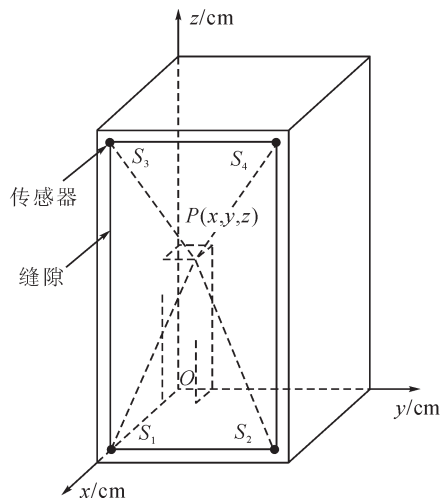


图 1 开关柜局部放电定位示意图

Fig. 1 Partial discharge location in switchgear

定位时选择信号最先到达的传感器作为参考信号(假设为传感器 1),以此为基准,第 i 个传感器测量到的局放信号 S_i 与参考传感器测量到的局放信号 S_1 之间的到达时间差为 $t_{i1} = t_i - t_1$ ($i=2, 3, 4$)。

列出如下含有 3 个方程的非线性方程组

$$f_i(x, y, z) = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} - \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2} - c \cdot t_{i1} = 0. \quad (2)$$

式(2)中, $i=2, 3, 4$ 。式(2)对应的轨迹分别是以 $(S_1, S_2), (S_1, S_3), (S_1, S_4)$ 为焦点的 3 个旋转双曲面,这些双曲面将相交于一点,该点即为局部放电源。为了验证双曲面定位方法的正确性,对某隔室进行 FDTD 仿真分析,仿真模型按照图 1 建立,以幅值 I_0 为 1 A、脉冲宽度为 1 ns 的高斯电流源作为局部放电源。4 个传感器分别设置在某隔室表面的 4 个顶点附近。局部放电源及传感器的空间坐标见表 1。阈值法确定的信号到达时间差见表 2。

表 1 局部放电源及传感器的空间坐标

Table 1 Position coordinates of PD source and sensors

PD源 坐标/cm	S_1 /cm	S_2 /cm	S_3 /cm	S_4 /cm
(20, 20, 20)	(101, 4, 4)	(101, 76, 4)	(101, 4, 156)	(101, 76, 156)

表 2 信号到达时间差的理论值与实际值对比

Table 2 Theoretical and practical time differences of signals

时间差	t_{12}	t_{13}	t_{14}
信号到达理论时间差/ns	0.522 1	2.500 0	2.793 6
信号到达实际时间差/ns	0.500 7	2.526 9	2.808 0

将非线性方程组的求解转化为无约束最优化问题,目标函数为

$$\min F(x, y, z) = \sum_{i=2}^4 f_i(x, y, z)^2. \quad (3)$$

文中选择拟牛顿校正 BFGS 法对目标函数式(3)优化^[11]。不同初始值下对应的迭代次数、局部放电源的定位结果、以及定位误差,见表 3。实际局部放电源的位置为 $P(x, y, z) = (20 \text{ cm}, 20 \text{ cm}, 20 \text{ cm})$ 。

表 3 BFGS 法定位结果

Table 3 Location result of BFGS

X_0 /cm	迭代次数	$P^*(x^*, y^*, z^*)$ /cm	误差/cm
(50, 50, 50)	23	(18.6, 20.6, 18.6)	1.4
(80, 80, 80)	29	(18.6, 20.6, 18.6)	1.4
(5, 5, 5)	17	(18.6, 20.6, 18.6)	1.4

由表 3 中的结果可知,拟牛顿校正 BFGS 法避免了因 Hessian 矩阵奇异而导致的计算失败。初值 X_0 为 (5 cm, 5 cm, 5 cm) 时的迭代过程见图 2。

2.2 空间网格搜索法

双曲面法需要求解方程组,而空间网格搜索法无需求解非线性方程组^[12]。该方法的原理是:假定所选择的定位空间在 3 个坐标轴上的长度分别

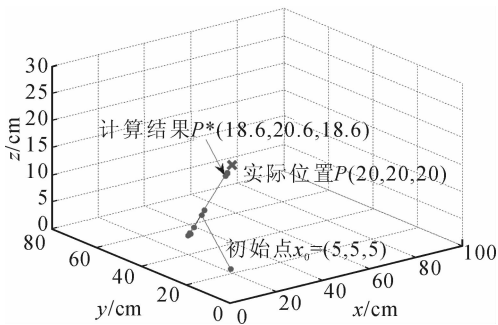


图 2 BFGS 法定位迭代过程

Fig. 2 Iteration progress of location by BFGS

为 L_x, L_y, L_z , 选择剖分网格的大小为 $\Delta l \times \Delta l \times \Delta l$, 则网格空间共 $n=(L_x/\Delta l+1)(L_y/\Delta l+1)(L_z/\Delta l+1)$ 个节点, 在 4 个传感器的空间坐标已知的基础上, 将网格空间中的 n 个节点作为局部放电源, 分别求取 n 个节点对应的 3 个理论信号到达时间差 ($t_{nl12}, t_{nl13}, t_{nl14}$), n 取 $1, 2, \dots, n_0$. 设实际信号到达时间差为 (t_{12}, t_{13}, t_{14}), 将每个节点对应的 3 个理论信号到达时间差与 3 个实际信号到达时间差进行比较, 求 $(|t_{nl12}-t_{12}|+|t_{nl13}-t_{13}|+|t_{nl14}-t_{14}|)$ 中的最小值, 则实际放电源处于以该节点为中心的小立方体区域中, 定位空间剖分见图 3。

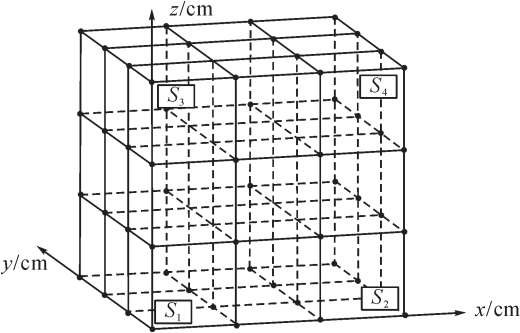


图 3 定位空间剖分图

Fig. 3 Subdivision of space for location

将表 2 中利用阈值法计算的 3 个信号到达时间差 t_{12}, t_{13}, t_{14} 代入到计算程序中, 当使用不同的剖分网格尺寸时, 可得到总剖分节点数 n 、局部放电源的定位结果以及理论与实际信号到达时间差。通过比较后得到的最小值 $\min(|t_{il12}-t_{12}|+|t_{il13}-t_{13}|+|t_{il14}-t_{14}|)$ ($i=1, \dots, n$), 见表 4。实际局部放电源位置为 $P(x, y, z)=(20 \text{ cm}, 20 \text{ cm}, 20 \text{ cm})$ 。

由表 4 中的结果可知, 和双曲面定位法相比, 空间网格搜索法需要对求解空间网格剖分, 会产生离散误差, 但是对信号到达时间差要求不高。另外, 空间网格搜索法相比基于解析算法的双曲面定位法在求解速度上有极大的优势。网格尺寸为 $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ 时的定位结果见图 4。

表 4 空间搜索法定位结果

Table 4 Location results based on grid space model

网格尺寸/cm	节点数 n	计算结果 $P^*(x^*, y^*, z^*)/\text{cm}$	$\min(t_{il12}-t_{12} + t_{il13}-t_{13} + t_{il14}-t_{14})/\text{ns}$
10×10×10	1 683	(20, 20, 20)	0.062 8
5×5×5	11 781	(10, 20, 15)	0.043 6

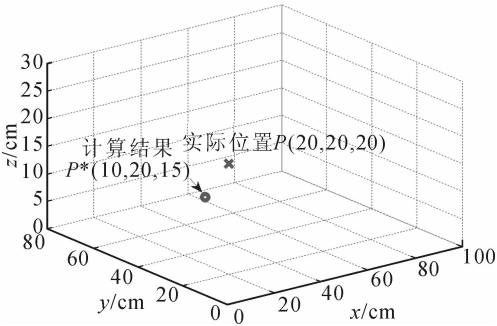


图 4 空间网格搜索法定位结果

Fig. 4 Location result based on searching space grids

2.3 开关柜局放定位试验

在实验室搭建了如图 5 所示的开关柜局放定位系统, 它由模拟局部放电源、传感器、四通道高速数据采集卡、信号测量软件等组成。用针板放电模型来模拟局放源, 模型示意图及实物图见图 6。



图 5 开关柜局部放电定位试验平台

Fig. 5 Platform for partial discharge location

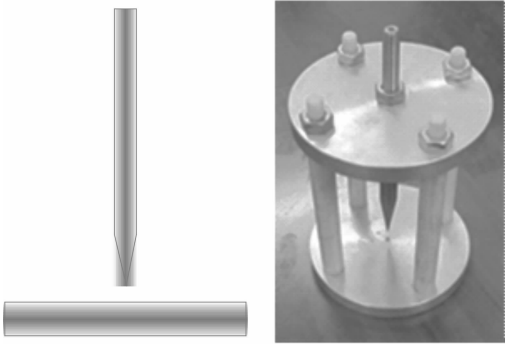


图 6 针板放电模型

Fig. 6 Model of needle-plate electrodes

图 5 为实验室的 3 个并排连接的开关柜, 从左向右依次是 a、b、c。将局放模型放入开关柜 a 的电缆室, 使用 3 个传感器 A、B、C, 两两相距约 80 cm

沿直线贴在3个开关柜前表面,测量信号见图7。通道A、B时间差小于1 ns,通道B、C时间差大于3 ns,因此局放信号源应在a与b之间。随后利用矩形排列方式,确定信号来源于a。第3步将传感器A、B、C、D分别贴在开关柜的仪表室、断路器室、母线室和电缆室,根据4个传感器接收信号到达的先后顺序最终确定了局部放电源处于电缆室。最后,将4个传感器放置在开关柜后部电缆室表面的4个角上,利用4通道的信号可以计算出局放源的位置,电缆室表面矩形放置的4路信号见图8。

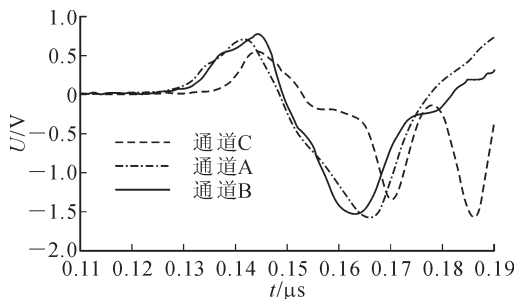


图7 直线排列方式测得的3路信号

Fig. 7 Signals detected by three sensors in a line

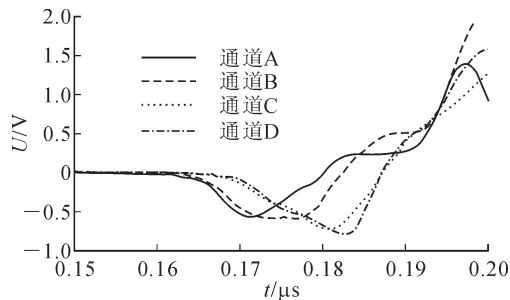


图8 电缆室表面矩形放置的4路信号

Fig. 8 Signals detected by four sensors along a rectangular

以待定位电缆室的左下角为坐标原点,建立空间直角坐标系,局部放电源及传感器的空间坐标见表5。采用能量法来确定4路信号的波头时间,得到信号的实测到达时间差见表6。

表5 实验测量局部放电源及传感器的空间坐标

Table 5 Position coordinates of PD source and sensors

PD源坐标	S_1	S_2	S_3	S_4
(45, 21, 42)	(0, 0, 0)	(72, 0, 0)	(0, 0, 114)	(72, 0, 114)

表6 信号到达时间差的实测值

Table 6 The measured value of arrival signals

参数	t_{12}	t_{13}	t_{14}
信号到达实际时间差/ns	0.8	3.2	4.0

由于高速采集卡采样率的限制,信号到达时间差精度不是很高,因此使用双曲面定位法来定位将

产生很大的误差。针对这种情况,分别选择10 cm×10 cm×10 cm和5 cm×5 cm×5 cm的网格尺寸,利用空间网格搜索法进行定位,计算结果均为 $P^*(x^*, y^*, z^*) = (10 \text{ cm}, 40 \text{ cm}, 30 \text{ cm})$,误差为35 cm。由计算结果可以看出,开关柜局放定位的精度受高速采集卡的采样率的影响较大。该次试验由于采样率的限制使得定位结果有一定的误差,定位系统的性能还有待改进。

3 放电源的参数评估

通过放电源位置、传感器位置、传感器接收TEV信号可以对放电源脉冲参数进行评估,确定实际放电强度,文中对此进行了仿真研究^[13-15]。

3.1 参数评估基本原理

通常将局部放电源简化为高斯电流源进行评估,采用FDTD计算程序,并利用最优化方法对局部放电脉冲参数即等效电流峰值 I_0 和局部放电脉宽 τ 进行优化评估,这属于电磁逆问题求解。

图9是高斯脉冲源的示意图,当传感器的接收位置以及放电源的位置确定时,传感器接收到信号的波形只取决于局部放电源的等效脉宽 τ 与等效幅值 I_0 ^[16-17]。

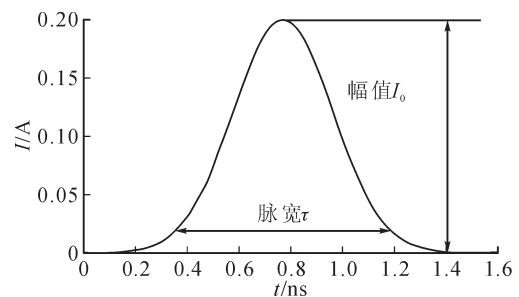


图9 放电源的脉冲参数

Fig. 9 Parameters of discharge pulse

如果使用 m 个紧贴在开关柜表面的瞬态电场测量传感器监测开关柜表面的电场变化,根据传感器测量到的 m 个电场信号波形,两个未知的参数 $x = (x_1, x_2) = (\tau, I_0) = (n\Delta t, I_0)$ 可以通过最小化如下的目标函数而被估算出来。

$$F = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{k=1}^m \left\{ \sum_{j=1}^N [E_k(j\Delta T, x) - E_{km}(j\Delta T)]^2 \right\} \Delta T} \quad (4)$$

式(4)中: k 为传感器的编号; N 为离散测量点的总数; T 为信号测量的持续时间; ΔT 为测量的时间间隔; $E_{km}(j\Delta T)$ 是第 k 个传感器在开关柜表面某一点测量的瞬态电场信号; $E_k(j\Delta T)$ 是与第 k 个传感器在相同点时使用FDTD程序计算的瞬态电场信号。

3.2 模拟退火算法

近些年来发展起来的无启发式全局最优化算法,通过模拟和揭示某自然现象或过程从而解决复杂的问题^[18]。当决策变量 x 为离散状态时,全局最优化问题成为组合优化问题,可写为

$$\begin{aligned} \min F(x) \\ s.t. g(x) \geq 0 \quad x \in D. \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)中: x 为决策变量; $F(x)$ 为目标函数; $g(x)$ 为约束函数; D 为由有限个点组成的可行域。

模拟退火法(SA)的基本思想源于物理退火过程。固体等温情况下的平衡过程可以用 Metropolis 准则模拟。假设在状态 x_{old} 时,系统受到了某种扰动而使其状态变为 x_{new} ,与此相对应,系统的能量也从 $F(x_{old})$ 变成 $F(x_{new})$,系统由状态 x_{old} 变为状态 x_{new} 的接受概率为

$$p = \begin{cases} 1 & F(x_{new}) < F(x_{old}) \\ \exp\left[\frac{F(x_{old}) - F(x_{new})}{T}\right] & F(x_{new}) \geq F(x_{old}) \end{cases} \quad (6)$$

当 $F(x_{new}) < F(x_{old})$ 时,当前状态 x_{new} 为可接受的重要状态 x_{best} ;当 $F(x_{new}) \geq F(x_{old})$ 时,在 $[0, 1]$ 之间产生一个随机数 ξ ,如果 $\xi < p$,则当前状态 x_{new} 为可接受的重要状态 x_{best} ;如果 $\xi > p$,则舍去当前状态 x_{new} 。在同一温度下,重复以上新状态的产生过程,经过大量的迭代直到系统趋于能量最低的平衡态。随着温度下降,接收概率 p 减小。模拟退火算法与物理退火过程的相似关系见表 7^[19-20]。

表 7 模拟退火算法与物理退火过程的关系

Table 7 Relationship between SA and annealing

模拟退火算法	物理退火过程
解	分子状态
最优解	能量最低态
控制参数初始值	高温溶解
Metropolis 准则模拟	等温过程
控制参数下降	冷却过程
目标函数	能量

标准模拟退火算法的一般步骤可以描述如下:

1)在解空间任选一个初始解 x_0 ,并令 $i=0$,最优解 $x_{best}=x_0$,最优值(目标函数最小值)为 $F(x_{best})$,确定初始温度 t_i ;

2)若在该温度下达到内循环终止条件,则转向 6)否则转向 3);

3)在当前最优解 x_{best} 按照某一邻域函数产生一个新的邻域解 x_{new} ,令 $\Delta F = F(x_{new}) - F(x_{best})$;

4)如果 $\Delta F < 0$,则令 $x_{best}=x_{new}$, $F(x_{best})=F(x_{new})$ 转 2),否则产生 $[0, 1]$ 之间的随机数 ξ ;

5)若 $\exp(-\Delta F/t_i) < \xi$,转 3);否则,令 $x_{best}=x_{new}$, $F(x_{best})=F(x_{new})$ 转 2);

6)降温,令 $t_{i+1}=\text{update}(t_i)$, $i=i+1$,若满足终止条件,算法结束,否则转 3)。

3.3 放电源脉冲参数的评估

采用图 1 的模型进行仿真研究,当使用 4 个传感器的测量结果来对脉冲参数进行评估时,假设将通过仿真得到的距离开关柜前表面 1 cm 处某 4 个点(50, 13, 109), (50, 49, 109), (50, 13, 13), (50, 49, 13)的信号作为实际测量到的 4 个瞬态电场信号。设置多个不同的真实高斯脉冲参数 $x^*=(\tau^*, I_0^*)=(n^*\Delta t, I_0^*)$,令模拟退火算法的初始值为 $x^0=(\tau^0, I_0^0)=(80\Delta t, 3)$,等效脉宽 τ 的搜索区间设为 $[20\Delta t, 300\Delta t]$,等效幅值 I_0 的搜索区间设为 $[0.1, 20]$,通过优化算法与 FDTD 计算程序的反复迭代,当算法终止时参数值收敛于最优解 $x=(\tau, I_0)=(n\Delta t, I_0)$ 。

表 8 为基于 4 个传感器测量结果的局部放电脉冲参数的优化结果,可见全局优化模拟退火算法与 FDTD 计算程序的组合算法评估高斯局部放电源的等效脉宽 τ 的最大误差为 0.2%,评估等效幅值 I_0 的最大误差为 3%。从计算结果可以看出,使用多个传感器测量结果来对脉冲参数进行评估可以得到比较精确的结果。

表 8 4 传感器局部放电脉冲参数的优化结果

Table 8 Optimization for pulse parameters of four sensors

条件	真实高斯脉冲参数 $x^*=(\tau^*, I_0^*)=(n^*\Delta t, I_0^*)$	优化高斯脉冲参数 $x=(\tau, I_0)=(n\Delta t, I_0)$
脉宽 τ 确定	(60 Δt , 0.5)	(59.9 Δt , 0.5)
	(60 Δt , 1)	(60 Δt , 0.99)
	(60 Δt , 2)	(59.9 Δt , 2)
幅值 I_0 确定	(80 Δt , 1)	(80 Δt , 0.97)
	(100 Δt , 1)	(99.8 Δt , 1)
	(120 Δt , 1)	(119.9 Δt , 1)

4 结语

文中研究了基于双曲面定位法和空间网格搜索法的开关柜局部放电精确定位方法,建立了开关柜某隔室的简化仿真模型,并通过实验验证了上述方法的有效性。

在精确定位放电源的基础上,又提出了将局部放电源简化为高斯电流源,并利用模拟退火算法与 FDTD 法的组合计算对脉冲参数进行评估。仿真研究结果表明利用文中方法可以对模拟高斯脉冲的等效脉宽 τ 和等效电流幅值 I_0 进行较为精确的评估。

参考文献:

- [1] TSURIMOTO T, YOSHIMURA M, MUTO H, et al. Partial discharge monitoring system for cubicle type GIS [C]// International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. Beijing, China: IEEE, 2008: 21-24.
- [2] 李刚, 朱革兰. 配网开关柜状态检测与评价实施方式的探讨[J]. 高压电器, 2013, 49(8): 133-138.
LI Gang, ZHU Gelan. Study on the implementation of switchgear status detection and evaluation for distribution system[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(8): 133-138.
- [3] 王俊波, 章涛, 李国伟. 在线检测 10 kV 开关柜局部放电方法研究[J]. 绝缘材料, 2011, 44(6): 60-64.
WANG Junbo, ZHANG Tao, LI Guowei. On-line detection of 10 kV switchgear by partial discharge technology[J]. Insulating Materials, 2011, 44(6): 60-64.
- [4] 任明, 彭华东, 陈晓清, 等. 采用暂态对地电压法综合检测开关柜局部放电[J]. 高电压技术, 2010, 36(10): 2460-2466.
REN Ming, PENG Huadong, CHEN Xiaoqing, et al. Comprehensive detection of partial discharge in switchgear using TEV [J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(10): 2460-2466.
- [5] CONTIN A, CAVALLINI A, NONTANARI G C, et al. Digital detection and fuzzy classification of partial discharge signals[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2002, 9(3): 335-348.
- [6] 韩涛. 基于 TEV 的开关柜局部放电检测及模式识别方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2011.
HAN Tao. Switchgear partial discharge detection and pattern recognition based on TEV[D]. Tianjin: Tianjin University, 2011.
- [7] 邵晟. 用 FDTD 算法计算高频电磁波在复杂环境下的传播特性[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
SHAO Sheng. Calculating HF electromagnetic wave transmission characteristics with FDTD method in complex environment[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
- [8] 王流火, 吕鸿, 王增彬, 等. 开关柜局部放电检测定位技术的应用研究[J]. 广东电力, 2014, 27(4): 91-94.
WANG Liuhuo, LYU Hong, WANG Zengbin, et al. Study on application of partial discharge detection and positioning technology for switch cabinet[J]. Guangdong Electric Power, 2014, 27(4): 91-94.
- [9] 陶晔. 开关柜局部放电带电检测定位技术应用研究[C]// 2010 年云南电力技术论坛. 云南: 云南电网公司, 云南省电机工程学会, 2010: 7.
TAO Ye. Application research on the localization technology of partial discharge detection in switchgear [C]// 2010 Yunnan Electric Power Technology Forum. Yunnan: Electric Engineering Society of Yunnan Province, Yunnan Power Grid Co., 2010: 7.
- [10] 孔令明, 肖云东, 刘娟, 等. 开关柜局部放电带电检测定位技术的应用与研究[J]. 山东电力技术, 2010(6): 5-8.
KONG Lingming, XIAO Yundong, LIU Juan, et al. Application and research of the PD of switchgear detection and location[J]. Shandong Electric Power, 2010(6): 5-8.
- [11] 冀春楼, 夏颂佑, 林益才. 拟牛顿法求解堆石坝结构非线性方程[J]. 河海大学学报, 1995(4): 77-84.
JI Chunlou, XIA Songyou, LIN Youcai. Application of quasi-Newton method to nonlinear FEM equation of rock fill dams[J]. Journal of Hohai University, 1995(4): 77-84.
- [12] 亢生彩. 网格搜索法 SVM 参数优化在主扇风机故障诊断中的应用[J]. 煤炭技术, 2015(1): 295-297.
KANG Shengcai. Grid search method SVM parameter optimization application in fault diagnosis of main fan[J]. Coal Technology, 2015(1): 295-297.
- [13] 骆洁艺. 基于暂态地电压和超声波测试的 10 kV 开关柜绝缘状态评估技术的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
LUO Jieyi. Research on insulation assessment technology of 10 kV switchboard based on ultra TEV and ultrasonic wave test[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.
- [14] 杨献智, 章坚. 10 kV 配网开关柜局部放电带电检测应用[J]. 电力科学与工程, 2011(6): 71-75.
YANG Xianzhi, ZHANG Jian. Application of 10 kV switchgear partial discharge detection for distribution system[J]. Electric Power Science and Engineering, 2011(6): 71-75.
- [15] BROWN P. Nonintrusive partial discharge measurements on high voltage switchgear[C]// 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. Beijing: IEEE, 2008: 385-388.
- [16] 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.
- [17] 谢颜斌. 超高频局部放电信号等效源数学模型及其与放电量的关联分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
XIE Yanbin. Study on mathematical model of equivalent source of PD in GIS and calibration of discharge quantity of UHF signal[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [18] 经红霞. 无约束最优化问题的算法研究与实现[D]. 北京: 北京邮电大学, 2013.
JING Hongxia. The methods for unconstrained optimization problems and their realizes[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2013.

- 法[J]. 无损检测, 2003(7):337-339.
- YANG Yi, CHEN Yifang, HONG Yuping, et al. Ultrasonic inspection of composite insulator[J]. Non-destructive Test, 2003(7):337-339.
- [13] 范兴明, 马世伟, 张 鑫, 等. 超声无损检测及其在电力绝缘子探伤中的应用[J]. 高压电器, 2014, 50(3):109-114.
- FAN Xingming, MA Shiwei, ZHANG Xin, et al. Application of ultrasonic non-destructive testing to power insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(3):109-114.
- [14] 蒋 云, 王维东, 蔡红生, 等. 支柱瓷绝缘子及瓷套超声波检测[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- JIANG Yun, WANG Weidong, CAI Hongsheng, et al. Ultrasonic testing of porcelain post insulators and bushing[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.
- [15] 司文荣, 黄 华, 傅晨钊, 等. 超声检测进行气体绝缘组合电器典型绝缘缺陷识别[J]. 高压电器, 2011, 47(12):11-18.
- SI Wenrong, HUANG Hua, FU Chenzhao, et al. Integrated classification technique for typical insulation flaws in gas-insulated switchgear based on acoustic detection[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(12):11-18.
- [16] 牛伸克, 姜 涛, 王祥林, 等. 高压开关触头水浸超声自动检测装置及其应用[J]. 高压电器, 2001, 37(4):53-57.
- NIU Shenke, JIANG Tao, WANG Xianglin, et al. Automatic scan device of ultrasonic immersion and its application in detecting the defects of contact welding[J]. High Voltage Apparatus, 2001, 37(4):53-57.
- [17] 罗宏建, 周重回, 赵洲峰, 等. 超声衍射时差技术在气体绝缘组合电器焊缝检测中的应用[J]. 无损检测, 2015, 37(1):56-59.
- LUO Hongjian, ZHOU Chonghui, ZHAO Zhoufeng, et al. Application of TOFD detection technology in gas insulated switchgear[J]. Non-destructive Test, 2015, 37(1):56-59.
- [18] 冯 若. 超声手册[M]. 南京: 南京大学出版社, 1999.
- FENG Ru. Ultrasonic manual[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1999.
- [19] 闫 力. 环氧复合材料内电极超声检测及其对电场影响的研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2009.
- YAN Li. Study on the detecting of the surface of the electrode in epoxy organic materials by ultrasonic and its influence to the electrical field[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2009.
- [20] 史亦韦. 超声检测[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- SHI Yiwei. Ultrasonic detection[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2009.

申 巍(1983—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事电力设备检测与诊断以及绝缘状态评价方面的工作。

孟永鹏(1976—), 男, 工学博士, 西安交通大学电气工程学院讲师, 分别于1998年、2001年和2006年在西安交通大学获得电气工程工学学士、硕士和博士学位。目前主要从事绝缘材料劣化机理与寿命评估、绝缘检测新技术、以及电力设备状态监测与故障诊断方面的教学与研究工作(通讯作者)。

(上接第 144 页)

- [19] 庞 峰. 模拟退火算法的原理及算法在优化问题上的应用[D]. 吉林: 吉林大学, 2006.
- PANG Feng. The principle of SA algorithm and algorithm's application on optimization problem[D]. Jilin: Jilin University, 2006.
- [20] 朱颢东, 钟 勇. 一种改进的模拟退火算法[J]. 计算机技术与发展, 2009(6):32-35.
- ZHU Haodong, ZHONG Yong. A kind of renewed simulat-

ed annealing algorithm[J]. Computer Technology and Development, 2009(6):32-35.

郑建康(1968—), 男, 高工, 主要从事高电压与绝缘技术方面的研究。

孙浩杰(1991—), 男, 西安交通大学硕士研究生, 主要从事电力设备绝缘状态诊断方面研究。