

DOI:10.12158/j.2096-3203.2023.05.025

高压开关柜局部放电 TEV 信号传播衰减特性

林奕夫¹, 叶兆平¹, 刘冬晨², 陈雪¹, 郑书生²

(1. 国网福建省电力有限公司, 福建 福州 350007;

2. 华北电力大学(新能源电力系统国家重点实验室), 北京 102206)

摘要:高灵敏度状态感知是实现设备数字化运维的关键环节,也是实现设备状态分析与全生命周期管理的重要前提。局部放电暂态地电压(transient earth voltage, TEV)检测是实现开关柜绝缘状态感知的主要手段,其检测灵敏度受到放电类型与部位、检测位置的影响,目前缺乏系统研究。文中建立基于实测脉冲电流波形的时域有限差分法的电磁波仿真模型;分析局部放电脉冲电流波形上升沿时间、放电源位置及脉冲电流方向等因素对 TEV 幅值与衰减程度的影响;在实验室开展开关柜局部放电试验与 TEV 测量,得到影响 TEV 检测灵敏度的主要因素。结果表明,脉冲电流上升沿时间与放电源位置是影响开关柜局部放电信号幅值的主要因素。脉冲电流上升沿时间越长,TEV 信号幅值越小,当 2 种脉冲电流波形上升沿时间相差 10 倍时,TEV 幅值相差 3.17~3.37 倍;母排室局部放电的 TEV 衰减程度明显大于电缆室,前者衰减程度约为后者的 9.5~10.0 倍。该结论对检验 TEV 检测灵敏度具有参考价值。

关键词:高压开关柜;局部放电;传播特性;时域有限差分(FDTD)法;脉冲电流;暂态地电压(TEV)

中图分类号:TM835

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2023)05-0224-08

0 引言

电力作为能源行业的中心,其数字化转型是实现能源清洁低碳转型的基础。输变电装备是电力系统的重要组成部分,加快其智能化、数字化发展是推动智能电网建设的重要保证。高灵敏度状态感知是实现设备数字化运维的关键环节,也是实现设备状态分析与全生命周期管理的重要前提^[1-3]。高压开关柜在电力系统发电、输电、配电和电能转换的过程中,起到开合、控制和保护用电设备的作用,是电力系统配电网中关键电气设备之一。在高压开关柜生产、运输、安装和维修过程中,不可避免地存在裂缝、污秽、受潮、金属毛刺、金属颗粒等缺陷,随着开关柜长期运行,这些缺陷导致绝缘表面或内部局部场强高于绝缘介质本身的临界场强,由此引发局部放电。同时,局部放电又将引起绝缘材料的劣化,这是绝缘故障的重要诱因^[4-7]。因此,加强局部放电状态感知是保证开关柜安全可靠运行的重要前提。

目前,国内外常用的开关柜局部放电检测方法主要有:脉冲电流法、特高频法、暂态地电压(transient earth voltage, TEV)法以及超声波法^[8-15]。TEV 法是高压开关柜局部放电带电检测方面的主要手段之一^[16]。高压开关柜内部发生局部放电时,会有高频电磁波产生并向四周传播,电磁波通过金属

箱体的接缝处及绝缘衬垫处传出,并沿金属箱体外表面继续传播,从而在箱体外表面与地之间产生暂态电压信号^[17-22]。利用电容耦合传感器对金属箱体外表面的暂态电压信号进行测量,得出其幅值和放电脉冲数等参数,并由此判断局部放电的强弱和特征。虽然 TEV 法在理论上的监测灵敏度较高,但开关柜表面 TEV 信号的强度与分布会受到多种因素影响,因此 TEV 传感器的布置会严重影响其检测灵敏度。为了系统研究局部放电 TEV 信号在开关柜表面的强度与分布特性,文中开展了局部放电电磁波传播仿真研究,分析了造成局部放电信号衰减的关键因素,并通过试验验证了局部放电信号衰减特性。

1 开关柜局部放电 TEV 传播仿真模型

1.1 三维仿真空间设置

为了便于直观分析 TEV 时域信号的衰减程度,采用时域有限差分(finite difference time domain, FDTD)方法开展仿真。在此方法中,将场域分成网格,用网格节点上离散的数值解替代求解场域内连续的场分布,即用网格节点的差分方程近似替代场域内的偏微分方程。

针对典型 10 kV 铠装式开关柜结构开展研究,文中用到的开关柜型号为 KYN28A-12,其整体尺寸(宽×深×高)为 800 mm×1 500 mm×2 250 mm。仿真模型如图 1 所示。其中,空间 B、C 的侧面有细小缝隙,缝隙宽度约为 5 mm,隔板厚度为 5 mm;柜体与

收稿日期:2023-02-23;修回日期:2023-04-19

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2020YFB0905902)

前柜门之前也有细小缝隙,缝隙宽度约为 1 mm;其他面和边角间没有明显缝隙,在仿真模型中作为无缝处理。整体的仿真实空间坐标为 $(-200, -580, -200)$ 至 $(1\,000, 1\,800, 2\,500)$,坐标单位为 mm。柜体的材料设置为钢,母排材料设置为铜,触头盒、绝缘子及电流互感器材料设置为环氧树脂,避雷器材料设置为硅橡胶,观察窗窗口材料设置为玻璃。剖分网格尺寸为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$,缝隙部分尺寸较小,为了保证缝隙能够正确地划分,在缝隙附近将网格细分为 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 。这样的网格划分满足 FDTD 方法的采样准则。

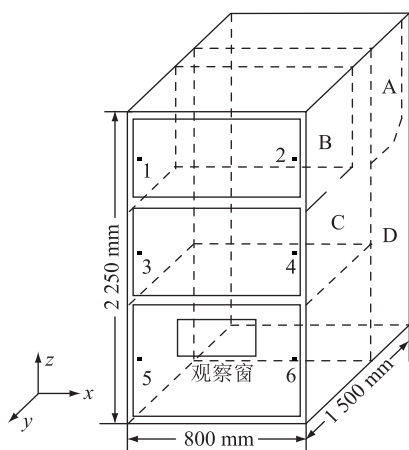


图 1 铠装式开关柜模型

Fig.1 Armored switchgear model

在仿真场中使用集中参数无源电阻进行电场和电压的转换,集中电阻不能直接连接在待测体表面,必须通过金属线将待测点的电场引入到集中电阻上。仿真设置吸收边界为零电位参考面,即将集中电阻的另一侧连接至吸收边界。在开关柜前柜门处设置了 6 个观测电阻,分别放置于上、中、下柜门的两条边上。传感器安装位置如图 1 中编号为 1—6 的黑色小方块所示。

1.2 局部放电脉冲电流实测与仿真参数设置

已有的研究工作对气体绝缘金属封闭开关或变压器局部放电脉冲电流波形及其辐射电磁波特征进行了测试和仿真。然而,对开关柜局部放电原始电流波形特征的研究尚未见到报道。为了保证仿真与试验的一致性,文中对开关柜局部放电电流波形进行测量,测量接线如图 2 所示。图 2 中,放电模型与高电压耦合电容 C_0 、无感电阻 R 组合为脉冲电流回路。上、下圆板电极的直径为 150 mm,间距为 80 mm; C_0 电容值为 100 pF; R 阻值为 50 Ω 。利用此回路,可准确测量上升沿时间小于 100 ps 的脉冲电流波形。根据开关柜常见的绝缘缺陷,制作 4 种典型放电模型,分别为尖端放电、沿面放电、悬浮

放电和气隙放电,如图 3 所示。

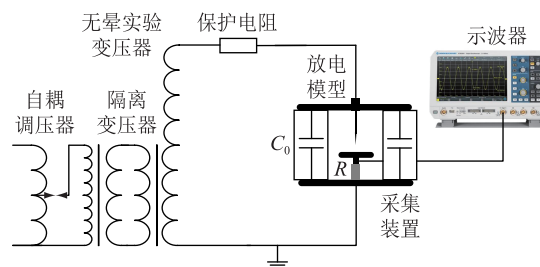


图 2 局部放电脉冲电流测量接线

Fig.2 Measurement connection diagram of partial discharge pulse current

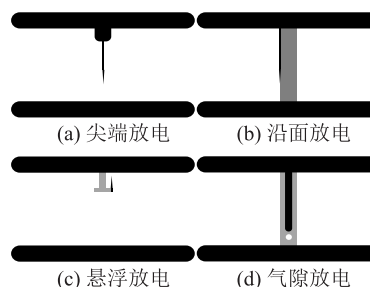


图 3 典型局部放电模型

Fig.3 Typical partial discharge models

脉冲电流波形的上升沿是产生辐射电磁波的主要成分,为此重点分析脉冲电流波形的上升沿持续时间。对每一种局部放电的脉冲电流波形进行多次采样,采集 100 组波形数据。然后读取每一个波形的上升沿时间,求取中位值,其结果如图 4 所示。

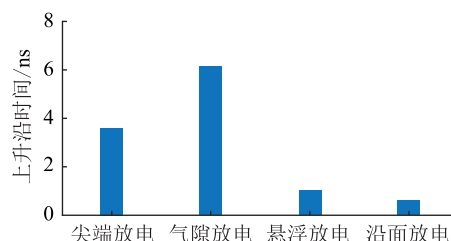


图 4 局部放电脉冲电流上升沿时间统计

Fig.4 Statistics of rise-up time of partial discharge pulse currents

从图 4 中可以看出,不同类型局部放电的脉冲电流波形上升沿时间有明显差异。这是由于不同放电类型的电极结构不同,因此其周围空间内的场强分布也存在很大差异,使得带电粒子的浓度、迁移速度以及电子崩的发展过程大相径庭,导致了不同放电类型的放电脉冲波形有着较大的差别,其中最主要的差别为其上升沿的宽度。

图 4 中,开关柜局部放电的上升沿时间分布在 0.5~6.2 ns 范围内。在此选择上升沿时间分别为 0.6、6.2 ns 的脉冲电流源作为局部放电电磁波信号

辐射源。文中参照气隙、沿面 2 种放电脉冲电流波形,选择上升沿时间为 6.2、0.6 ns 的脉冲电流源展开仿真分析。为了着重对比分析上升沿时间对电流的影响,对波形幅值进行归一化处理。图 5 为 2 种放电脉冲电流波形归一化后的图像,图 6 为其频谱图。由频谱图可见,在 0~0.1 GHz 频率范围内,上升沿时间越短,脉冲电流幅值越大。

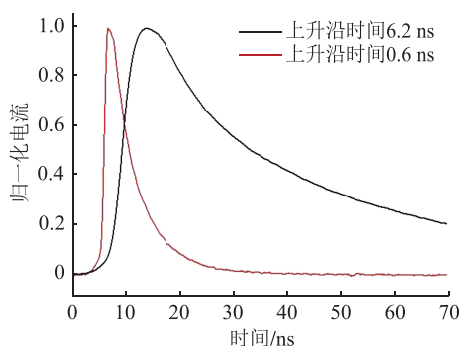


图 5 幅值归一化后的脉冲电流波形

Fig.5 Waveforms of normalized pulse currents

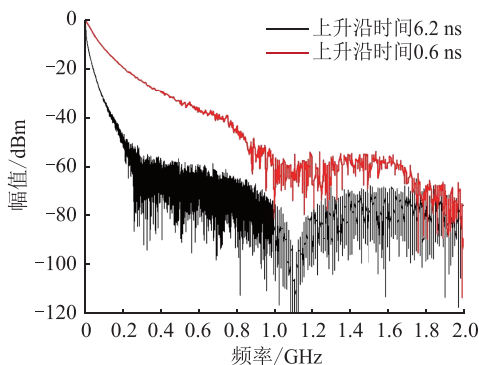


图 6 脉冲电流频谱

Fig.6 Spectrogram of pulse currents

2 TEV 信号强度及其主要影响因素

众所周知,到达开关柜外表面的电磁波强度受到局部放电的脉冲电流幅值、放电缺陷所在部位及开关柜结构的影响。除此之外,电磁波强度还将受到脉冲电流波形上升沿时间或陡度、脉冲电流源在三维空间中的方向等因素的影响。在其他条件一定的情况下,电磁波强度与脉冲电流幅值之间呈现线性关系,在此不作赘述。文中着重分析局部放电缺陷的发生部位、脉冲电流上升沿时间以及脉冲电流极化方向对到达开关柜外表面的 TEV 信号强度的影响。

2.1 局部放电发生位置对 TEV 信号幅值的影响

开关柜内绝缘故障主要发生在母排室与电缆室。局部放电位置分别设置在母排室,即图 1 中的 A 区域,以及电缆室,即图 1 中的 D 区域,在母排室

的放电源坐标 (x, y, z) 为 $(185, 1187, 1350)$;在电缆室的放电源坐标 (x, y, z) 为 $(185, 1187, 350)$,坐标单位均为 mm。为了排除其他因素影响,在仿真中脉冲电流源的波形保持一致,幅值为 1 A,脉冲电流源方向均为 z 方向。

经过 2 次仿真,读取 6 个观测点(编号为 1—6)的 TEV 幅值。各观测点的信号幅值如图 7 所示。由图 7 可知,在 6 个观测点获得的母排室局部放电 TEV 信号幅值均小于电缆室局部放电 TEV 信号幅值;无论局部放电发生部位在母排室或电缆室,开关柜下侧的观测点(即 5、6 观测点)可以获得比其他观测点更强的 TEV 信号;以 6 号观测点为例,电缆室局部放电 TEV 信号约为母排室局部放电信号的 10 倍。

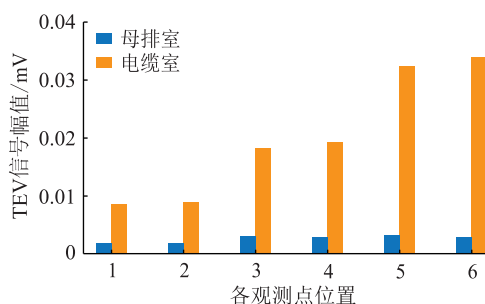


图 7 不同放电位置下各测量点 TEV 信号幅值仿真结果

Fig.7 The amplitude of TEV signal simulation results at each measurement point with different positions of discharge

从图 7 中可以看出,放电源在电缆室时,6 个观测点的 TEV 幅值相差很大,而放电源在母排室时,6 个观测点的 TEV 幅值相差不大,故对信号的传播进行研究。当放电源分别位于电缆室和母排室时,电磁波信号动态传播过程如图 8、图 9 所示。图 8 中可以看出当放电源在电缆室时,电磁波信号主要通过开关柜观察窗传播至柜体外,从而导致上、中、下三组观测点的电磁波信号强度有明显的差异,从上到下电磁波信号逐渐增强;图 9 中可以看出当放电源在母排室时,电磁波信号主要通过柜体缝隙传播至柜体外,所以上、中、下三组观测点的电磁波信号强度差异不大。当电磁波信号主要通过电缆室下方的玻璃隔板以及开关柜观察窗传播至柜体外时,玻璃隔板以及观察窗的材质为非金属,对电磁波的阻碍作用很小,相较于放电源在母排室时的情况,信号不会在箱体内部以及缝隙处的折反射过程中消耗大部分能量,其传播至外部空间的信号能量也更强,因此当放电源位于电缆室时 TEV 信号会比放电源在母排室时更大。

由于放电位置所造成的 TEV 信号幅值的差异,

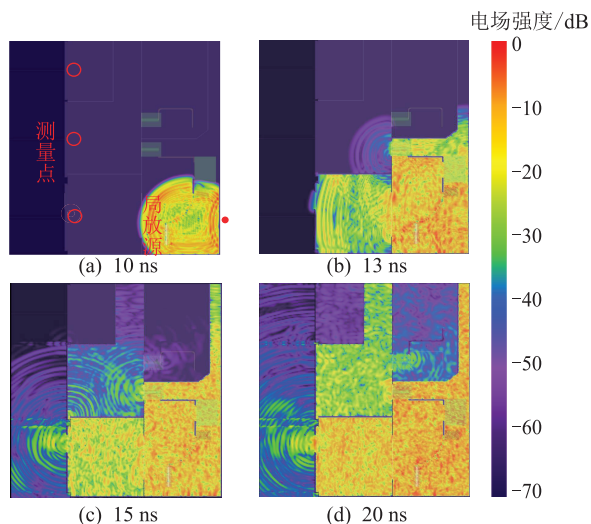


图8 电缆室局部放电信号动态传播过程

Fig.8 Dynamic propagation process of partial discharge signal in cable chamber

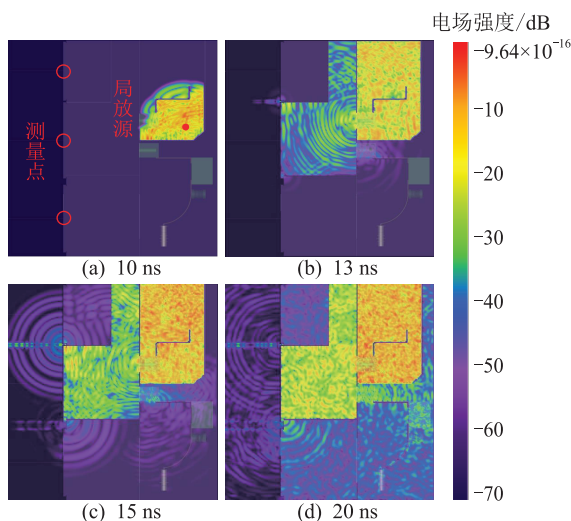


图9 母排室局部放电信号动态传播过程

Fig.9 Dynamic propagation process of partial discharge signal in busbar room

在本质上是由于不同位置的放电,其电磁波信号辐射至柜体外部的路径不同。当放电点位于母排室时,电磁波信号主要经过断路器触头盒、开关柜前面板两层阻碍,而后通过柜体缝隙才能辐射至外部;当放电点位于电缆室时,电磁波主要经过电缆室下方的玻璃隔板和前面板玻璃两层阻碍即可到达外部,且这两层材料对于电磁波的损耗较小。从图8、图9中可见,无论放电点位于母排室还是电缆室,其柜体前部柜门缝隙处的TEV信号都会有不小的幅值。当放电发生在电缆室时,下方柜门观察窗附近的信号幅值很大。因此,可以采用多点布置传感器的方法来提高TEV传感器的监测灵敏度。

2.2 脉冲电流上升沿时间对TEV信号幅值的影响

将脉冲电流源设置在开关柜母排室,线电流源

的长度均为20 mm,脉冲电流极化方向平行于 z 轴(即竖直方向),脉冲电流幅值均为1 A。经过仿真,在各观测点获得的信号幅值如图10所示。

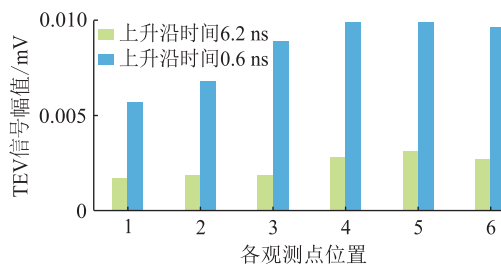


图10 不同脉冲电流上升沿时间下各测量点TEV信号幅值仿真结果

Fig.10 The amplitude of TEV signal simulation results at each measurement point under different rise-up time of pulse current

由图10可知,脉冲电流源上升沿时间为0.6 ns时的TEV信号幅值明显大于脉冲电流源上升沿时间为6.2 ns时的TEV信号幅值。以5号观测点为例,0.6 ns的TEV信号幅值比6.2 ns的高3.17倍。图6中,上升沿时间越短,在0~0.1 GHz内能量越大,由此产生的电磁辐射越强,TEV信号幅值也更大。

2.3 脉冲电流源方向对TEV幅值的影响

为研究脉冲电流源方向对TEV幅值的影响,在开关柜母排室设置脉冲电流源,且每次都保证电流源长度、电流波形等参数的一致性,仅改变脉冲电流源的方向。分别开展了3次仿真,线电流源的长度均为20 mm,均采用上升沿时间为6.2 ns的气隙放电脉冲电流波形,幅值均为1 A;在3次仿真中脉冲电流源方向不同,分别设置为 x 、 y 、 z 方向。仿真结果如图11所示。

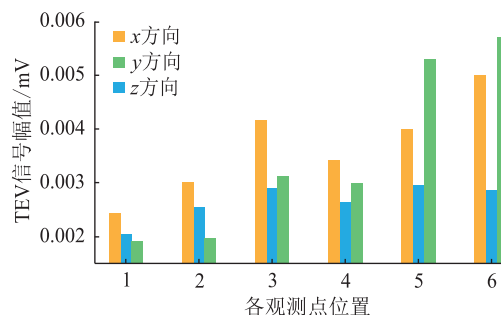


图11 不同脉冲电流源方向下各测量点TEV信号幅值仿真结果

Fig.11 The amplitude of TEV signal simulation results at each measurement point under different directions of pulse current

由图11可知,脉冲电流源的方向对各观测点的TEV信号幅值影响较小。以观测点6为例分析TEV信号的幅值变化,当脉冲电流方向沿 y 方向时

信号幅值最大,当脉冲电流方向沿 z 方向时信号幅值最小,前者约为后者的 2.5 倍。

3 开关柜局部放电试验与分析

3.1 试验与测量方法

在实验室环境下开展开关柜局部放电试验与信号测量,试验接线如图 12 所示。采用逐级升压法对局部放电缺陷模型施加高压,在脉冲电流、TEV 同时探测到稳定的信号后开始同步采集信号波形。图 13 为开关柜局部放电试验装置。试验变压器型号为 YD120/10,示波器型号为 PICO-6407A。TEV 传感器与其增益曲线如图 14 所示。

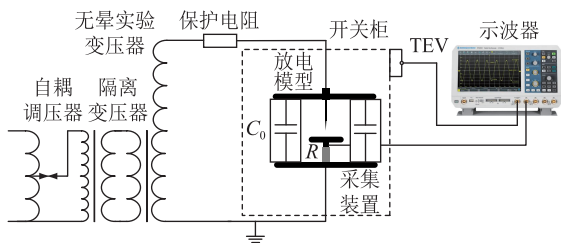


图 12 局部放电试验与测量回路

Fig.12 Partial discharge test and measurement circuit

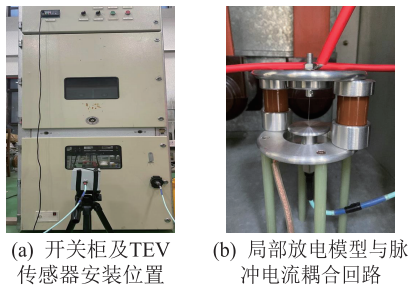


图 13 开关柜局部放电试验装置

Fig.13 Switchgear partial discharge test device

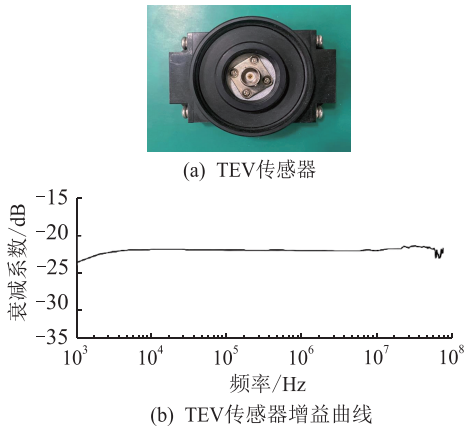


图 14 TEV 传感器与性能曲线

Fig.14 TEV sensor and its performance curve

3.2 局部放电源所在位置对 TEV 幅值影响的测试

将局部放电模型分别放置在母排室和电缆室

进行试验。在图 1 所示的开关柜边缘 6 个点观测 TEV 信号。试验电压为 9.5 kV 时,可采集到稳定的信号。为了对比局部放电位置的影响,在各观测点分别采集 100 组信号波形,读取最大幅值,最后取 100 个幅值的平均值。图 15 为 TEV 信号幅值平均值的统计结果。

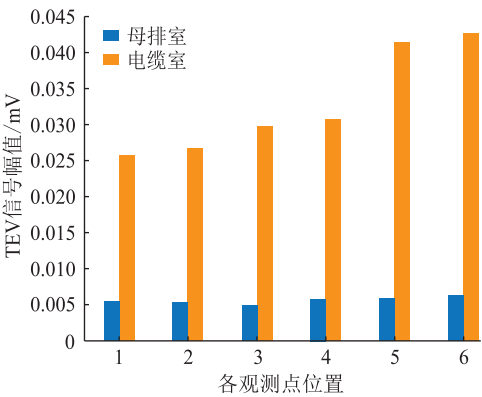


图 15 不同放电位置下各测量点 TEV 信号幅值

Fig.15 The amplitude of TEV signal at each measurement point under different positions of discharge

由图 15 可知,在观测点 1—6 获得的 TEV 信号幅值依次增强;母排室局部放电的信号幅值低于电缆室。以观测点 6 获得的 TEV 信号幅值为例,母排室低于电缆室 TEV 信号幅值,后者的信号约为前者的 9.5 倍。

3.3 脉冲电流源上升沿时间影响的测试

使用气隙放电、沿面放电模型进行实验。气隙放电上升沿时间为 6.2 ns,沿面放电上升沿时间为 0.6 ns。在试验中将 2 个局部放电模型均放置在开关柜母排室,高压电极与接地电极按照 z 方向布置,使局部放电脉冲电流方向沿 z 方向。2 个模型的试验电压分别为 9.5 kV 和 10.5 kV。图 16 为采用脉冲电流、TEV 检测 2 种方法及在不同放电类型下获得的局部放电信号波形。试验时,2 种方法同时检测,然后通过归一化的方法,对不同缺陷的测试结果进行对比。采用沿面放电模型时,原始电流约为 314 mA,此时 TEV 信号幅值为 19.8 mV;采用气隙放电模型时,原始电流约为 424 mA,此时 TEV 信号幅值为 9.6 mV。经归一化后得到图 16,在此近似认为 2 种局部放电的脉冲电流幅值相近;但脉冲电流上升沿时间相差 10 倍。

6 个观测点得到的 TEV 信号幅值如图 17 所示。由图 17 可知,沿面放电的幅值高于气隙放电;观测点 5 得到的信号幅值最高。在观测点 5 沿面放电比气隙放电的 TEV 信号幅值高 3.37 倍。

对 TEV 信号进行频谱分析。对观测点 6 的 TEV 信号波形进行傅里叶变换,以分析其频谱分布

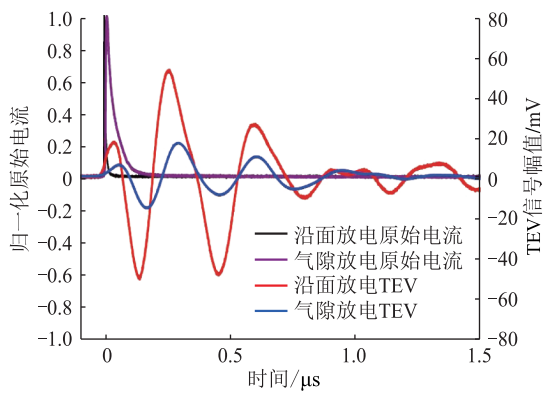


图 16 局部放电信号波形

Fig.16 Partial discharge signal waveforms

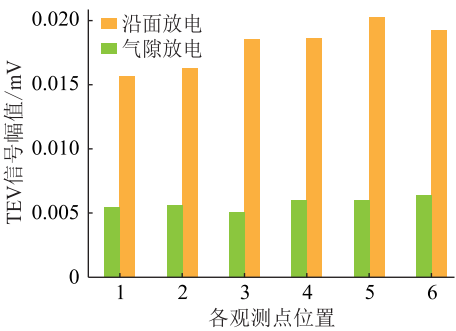


图 17 不同放电类型下各测量点 TEV 信号幅值

Fig.17 The amplitude of TEV signal at each measurement point under different discharge types

特征,如图 18 所示。由图 18 可知,气隙放电 TEV 信号的能量在 1~30 MHz,而沿面放电 TEV 信号的能量在 1~75 MHz,并且沿面放电信号能量明显较高。

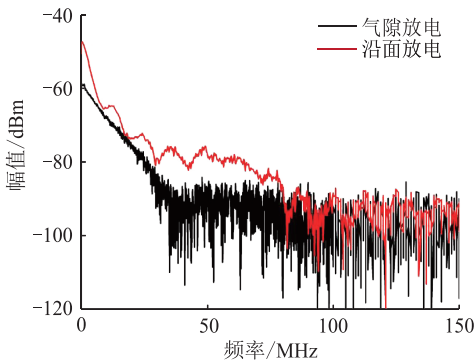


图 18 6 号观测点 TEV 信号频谱

Fig.18 Spectrogram of TEV signal at observation point 6

3.4 试验与仿真对比分析

对仿真和试验结果进行比对分析。对于局部放电源位置不同的结果,6 个观测点位置的仿真与试验结果的整体趋势基本一致,都是呈上升的趋势,并且仿真结果中电缆室局部放电 TEV 信号幅值约为母排室局部放电 TEV 信号幅值的 10 倍,试验

结果中电缆室 TEV 信号幅值约为母排室 TEV 信号幅值的 9.5 倍,如表 1 所示。

表 1 局部放电源位置不同的 TEV 结果比对(6 号观测点)

Table 1 Comparison of TEV results from different positions of partial discharge source (observation point 6)

结果	母排室 TEV 信号幅值/mV	电缆室 TEV 信号幅值/mV	后列与前列的比值
试验结果	0.034 10	0.034 10	10.0
仿真结果	0.004 51	0.042 84	9.5

对于局部放电源上升沿时间不同的结果,6 个观测点位置的仿真与试验结果的整体趋势也基本一致,也都是呈上升的趋势,并且试验结果中 0.6 ns 的 TEV 信号幅值是 6.2 ns 的 TEV 信号幅值的 3.17 倍,仿真结果中 0.6 ns 的 TEV 信号幅值是 6.2 ns 的 TEV 信号幅值的 3.37 倍,如表 2 所示。

表 2 局部放电源上升沿时间不同的 TEV 结果比对(5 号观测点)

Table 2 Comparison of TEV results form different rise-up time of partial discharge source (observation point 5)

结果	上升沿时间 6.2 ns TEV 信号幅值/mV	上升沿时间 0.6 ns TEV 信号幅值/mV	后列与前列的比值
试验结果	0.003 13	0.009 94	3.17
仿真结果	0.006 02	0.020 29	3.37

4 结论

文中从仿真与实验两方面分析了开关柜内局部放电的发生位置以及放电脉冲电流信号上升沿时间对于 TEV 信号测量值的影响,结果表明:

(1) 局部放电发生部位对信号的衰减程度有明显影响。当局部放电源处于不同位置时,信号的传播路径不同,信号的衰减也就不同。放电源位于母线室时的衰减程度明显大于放电源位于电缆室时,仿真与实验结果均表明前者 TEV 信号幅值的衰减程度要比后者严重 9.5~10.0 倍。

(2) 在局部放电脉冲电流信号幅值一定的情况下,其上升沿时间对 TEV 所测得的信号幅值有明显影响,即上升沿时间越长,脉冲电流在 0~0.1 GHz 内能量越小,TEV 信号幅值越小。局部放电源上升沿时间 0.6 ns 的 TEV 信号幅值是上升沿时间 6.2 ns 的 TEV 信号幅值的 3.17~3.37 倍

(3) 鉴于以上 2 点结论,建议针对不同类型、不同放电部位的局部放电源开展开关柜局部放电 TEV 检测灵敏度的评价工作,尤其应针对位于开关

柜母排室、上升沿时间较长的局部放电类型进行灵敏度测试。

致 谢

本文得到国网福建省电力有限公司重点科研项目“基于开关柜带电显示装置的局部放电带电检测技术”(52130021004Z)资助,谨此致谢!

参考文献:

- [1] 刘云鹏,刘一瑾,律方成,等. 数字孪生技术在输变电设备中的应用前景与关键技术[J]. 高电压技术,2022,48(5):1621-1633.
LIU Yunpeng, LIU Yijin, LYU Fangcheng, et al. Application prospect and key technology of digital twin in power transmission and transformation equipment[J]. High Voltage Engineering,2022,48(5):1621-1633.
- [2] 齐波,张鹏,张书琦,等. 数字孪生技术在输变电设备状态评估中的应用现状与发展展望[J]. 高电压技术,2021,47(5):1522-1538.
QI Bo, ZHANG Peng, ZHANG Shuqi, et al. Application status and development prospects of digital twin technology in condition assessment of power transmission and transformation equipment[J]. High Voltage Engineering,2021,47(5):1522-1538.
- [3] 张宁,马国明,关永刚,等. 全景信息感知及智慧电网[J]. 中国电机工程学报,2021,41(4):1274-1283,1535.
ZHANG Ning, MA Guoming, GUAN Yonggang, et al. Panoramic information perception and intelligent grid[J]. Proceedings of the CSEE,2021,41(4):1274-1283,1535.
- [4] 陈攀. 基于信号能量特征的开关柜局部放电监测及故障模式识别方法研究[D]. 重庆:重庆大学,2014.
CHEN Pan. Research on partial discharge monitoring and fault pattern recognition in switchgear based on the characteristics of the signal energy[D]. Chongqing:Chongqing University,2014.
- [5] DAVIES N, TIAN Y, CHEUNG J, et al. Non-intrusive partial discharge measurements of MV switchgears[C]//2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. Beijing. IEEE,2008:385-388.
- [6] 许高峰. 全封闭组合电器局部放电信号内置传感检测和分形特征提取的研究[D]. 重庆:重庆大学,2003.
XU Gaofeng. Study on detection of partial discharge in gas insulated substation by inner-sensing method and fractal feature extraction[D]. Chongqing:Chongqing University,2003.
- [7] 叶广耀. 基于地电波检测的高压开关柜局部放电监测系统[D]. 北京:华北电力大学,2013.
YE Guangyao. Switchgear partial discharge detection system based on TEV[D]. Beijing:North China Electric Power University,2013.
- [8] 王有元,李寅伟,陆国俊,等. 开关柜局部放电暂态对地电压传播特性的仿真分析[J]. 高电压技术,2011,37(7):1683-1688.
WANG Youyuan, LI Yinwei, LU Guojun, et al. Simulation of transient earth voltages aroused by partial discharge in switchgears[J]. High Voltage Engineering,2011,37(7):1683-1688.
- [9] 魏振,张强,齐波,等. 高压开关柜典型缺陷局部放电 TEV 特征的研究[J]. 高压电器,2014,50(2):60-67.
WEI Zhen, ZHANG Qiang, QI Bo, et al. Analysis of TEV caused by partial discharge of typical faults in HV switchgear[J]. High Voltage Apparatus,2014,50(2):60-67.
- [10] 陈国源,王笑飞,孟卫杰. 开关柜局部放电特高频信号传输特性[J]. 电力科学与工程,2022,38(5):44-50.
CHEN Guoyuan, WANG Xiaofei, MENG Weijie. Transmission characteristics of PD UHF signals of switchgear[J]. Electric Power Science and Engineering,2022,38(5):44-50.
- [11] 姚陈果,黄琮鉴,吴彬,等. 采用时域有限差分法分析开关柜中超高频率信号传播特性[J]. 高电压技术,2013,39(2):272-279.
YAO Chenguo, HUANG Congjian, WU Bin, et al. Propagation characteristics of UHF signals in switchgears by FDTD method[J]. High Voltage Engineering,2013,39(2):272-279.
- [12] 刘云鹏,王会斌,王娟,等. 高压开关柜局部放电 UHF 在线监测系统的研究[J]. 高压电器,2009,45(1):15-17.
LIU Yunpeng, WANG Huibin, WANG Juan, et al. Research on on-line partial discharge UHF monitoring system for high voltage switchboard[J]. High Voltage Apparatus,2009,45(1):15-17.
- [13] 张金波,王恒,段明浩,等. 基于脉冲电流法的高压开关柜局部放电在线监测装置的设计[J]. 自动化技术与应用,2018,37(4):100-105.
ZHANG Jinbo, WANG Heng, DUAN Minghao, et al. Design of partial discharge on-line monitoring device for high voltage switchgear based on pulse current method[J]. Techniques of Automation and Applications,2018,37(4):100-105.
- [14] 白鹭,李冠良,郑志宏. 基于脉冲电流法的 10 kV 开关柜局部放电检测装置的研发[J]. 山西电力,2020(3):23-26.
BAI Lu, LI Guanliang, ZHENG Zhihong. Research and design of partial discharge detection device for 10 kV switchgear based on pulse current method[J]. Shanxi Electric Power,2020(3):23-26.
- [15] 陶诗洋,冯义,张天辰,等. 基于脉冲电流法的高压开关柜局部放电在线监测装置[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(9):145-149.
TAO Shiyang, FENG Yi, ZHANG Tianchen, et al. High-voltage switch cabinet partial discharge on-line monitoring device based on pulse current method[J]. Power System Protection and Control,2019,47(9):145-149.
- [16] SONG X D, ZHOU C K, HEPBURN D M. An algorithm for identifying the arrival time of PD pulses for PD source location [C]//2008 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Quebec, QC, Canada. IEEE,2009:379-382.
- [17] ITOSE A, KOZAKO M, HIKITA M. Partial discharge detection and induced surface current analysis using transient earth voltage method for high voltage equipment[C]//2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD). Xi'an, China. IEEE,2016:456-460.

- [18] 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.
- [19] 曾雄杰,江健武,侯俊. TEV 和 UHF 在 10 kV 开关柜带电检测中的应用[J]. 高压电器,2012,48(1):41-47.
ZENG Xiongjie, JIANG Jianwu, HOU Jun. Application of TEV and UHF in PD detection for the live 10 kV switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(1): 41-47.
- [20] SIEGEL M, BELTLE M, TENBOHLEN S, et al. Application of UHF sensors for PD measurement at power transformers[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(1): 331-339.
- [21] 汪昂黎. 基于超声波传感器的高压开关柜局部放电在线监测研究[D]. 广州:华南理工大学,2017.
WANG Bingcan. Research on high voltage switchgear partial

discharge on-line monitoring based on ultrasonic sensor[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.

- [22] 王鹏,刘玉婷,邹阳,等. TEV 和超声波检测法在开关柜局部放电检测中的应用评述[J]. 高压电器,2020,56(10):75-83.
WANG Peng, LIU Yuting, ZOU Yang, et al. Application of TEV and ultrasonic detection methods in partial discharge detection of switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(10): 75-83.

作者简介:



林奕夫

林奕夫(1992),男,硕士,工程师,从事电力设备管理等相关工作(E-mail: yf.lin@qq.com);

叶兆平(1984),男,硕士,高级工程师,从事变电设备状态检修、诊断工作;

刘冬晨(1995),男,硕士在读,研究方向为高压设备状态监测。

Propagation and attenuation of TEV signals by partial discharge in high voltage switchgear

LIN Yifu¹, YE Zhaoping¹, LIU Dongchen², CHEN Xue¹, ZHENG Shusheng²

(1. State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350007, China;

2. North China Electric Power University (State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources), Beijing 102206, China)

Abstract: High sensitivity in condition monitoring is a key link in digital electrical equipment operation and maintenance, besides, it is also an important premise of status analysis and life cycle management. The partial discharge (PD) transient earth voltage (TEV) detection is the primary mean to insulation state perception of high voltage switchgear. The detection sensitivity of TEV method is affected by the type and location of the defect, the location of TEV detection. However, there is no systematic research on this subject by now. A finite difference time domain (FDTD) electromagnetic wave simulation model based on the measured pulse current waveform is established. The study explores the effects of factors such as the rise-up time of PD pulse current waveform, the position of discharge source, and the direction of pulse current on the amplitude and attenuation degree of TEV. A series of PD tests and TEV measurements are conducted in a laboratory setting to identify the primary factors influencing TEV detection sensitivity. The results reveal that both the rise-up time and spatial position of PD significantly affect the amplitude of the TEV signal. Specifically, the amplitude of the TEV signal exhibits a decreasing trend as the pulse current's rise-up time increases. Notably, a tenfold increase in the rise-up time results in a decrease in TEV signal amplitude within the range of 3.17 to 3.37 times. Furthermore, the TEV signal's attenuation degree in the busbar room compartment is approximately 9.5 to 10.0 times greater than that observed in the cable compartment. This conclusion has reference value for testing the sensitivity of TEV detection.

Keywords: high voltage switchgear; partial discharge; propagation characteristics; finite difference time domain (FDTD) method; pulse current; transient earth voltage (TEV)

(编辑 吴昊)