

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.08.006

1 100 kV GIS 设备内部缺陷局部放电带电检测方法试验研究 及比较分析

杨 宁¹, 毕建刚¹, 弓艳朋¹, 杨 圆¹, 常文治¹, 许 渊¹,
高群伟², 尹军华²

(1. 中国电力科学研究院, 北京 100192; 2. 河南平高电气股份有限公司, 河南 平顶山 467001)

摘要: 局部放电带电检测是判断特高压变电站GIS设备内部绝缘状况的重要手段之一。为分析不同带电检测方法的检测效果,依托1 100 kV GIS真型试验平台,设计了5种内部缺陷,并对缺陷模型进行了仿真计算。在仿真分析基础上,对其内部缺陷进行了试验研究,复现了GIS设备内部的真实放电。根据试验结果,利用雷达图的评价方法,对特高频法、超声波法、高频电流法局部放电带电检测的有效性进行了比较分析。试验及比较分析结果为研究1 100 kV GIS设备内部缺陷特征积累了经验,并对指导特高压变电站GIS设备的带电检测工作,以及多种检测方法的融合应用提供了数据支撑,并具有一定的借鉴价值。

关键词: GIS; 内部缺陷; 局部放电; 仿真分析; 试验研究

Experimental Research and Comparative Analysis on Live Test Methods of Partial Discharge of Internal Defects in 1 100 kV GIS

YANG Ning¹, BI Jiangang¹, GONG Yanpeng¹, YANG Yuan¹, CHANG Wenzhi¹, XU Yuan¹,
GAO Qunwei², YIN Junhua²

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 2. Henan Pinggao Electric Co., Ltd., Henan Pingdingshan 467001, China)

Abstract: Live test of partial discharge is one of the most important method to judge internal insulation condition of GIS equipment in UHV substation. In order to analyze the effect of different live test methods, internal defect models were established on the real type testing platform of 1 100 kV GIS. Then simulations and experimental research were carried out on the defect models. According to the test results, the effectiveness of the partial discharge live tests, including ultra-high frequency method, acoustic emission method and high frequency current method, was comparatively evaluated using radar graph. This study may facilitate the research of internal defect features of 1 100 kV GIS equipment, and provide data support to the live detection of GIS equipment in ultra-high voltage substation and to the integrative application of multiple detection methods.

Key words: GIS; internal defect; partial discharge; simulation; experimental research

0 引言

随着电网向高电压、大容量、集约化等方向发展,中国的特高压大电网建设正在不断推进,2016年中国已经建成“六交五直”的特高压工程,另有“一交六直”的特高压工程正在建设中^[1]。电网对于供

电可靠性和安全稳定运行的要求不断提升,由于GIS设备具有集成化好、占地少、可靠性高、受外界环境影响小的特点,特高压变电站普遍采用了GIS或HGIS的设计方式^[2~4]。

GIS设备采用全封闭的结构设计,其内部状态不可见,当发生缺陷或故障时,常难以直观发现。

据近十年来GIS故障统计,其中异物放电、绝缘子问题、绝缘拉杆故障等内部缺陷所占比例达51%^[5-9]。运行过程中,通过带电检测方法在GIS本体及设备周围布置传感器,感知局部放电时产生的脉冲电流、电磁波、振动、声音等异常信号,可以间接地对GIS内部绝缘状态进行判断。GIS设备常见的带电检测手段有特高频法、超声波法、高频电流法等^[10-12]。

1)特高频法。特高频法(ultra high frequency, UHF)利用局部放电辐射出的特高频电磁波信号进行检测,检测频带通常在300~1 500 MHz,可以有效地避开变电站现场的电晕放电等低频电磁干扰。由于GIS设备的同轴筒形结构特点,电磁波信号在其内部传播过程中衰减较少,因此特高频法具有较高的检测灵敏度和检测范围,并可以实现在线监测、模式识别及故障定位^[13-14]。GIS设备的特高频带电检测可以利用预装的内置传感器,或者在盆式绝缘子上安装外置传感器实现。外置传感器的安装受限于绝缘盆子的结构,不能够有金属屏蔽层阻止电磁波的传播。特高频检测的信号频带较高,这也对检测系统提出了一定要求。

2)超声波法。超声波法(acoustic emission, AE)利用在GIS腔体外部安装的超声波传感器,检测局部放电时产生的冲击振动及声音,并可通过多传感器的波形时差,实现放电源的精确定位^[15]。GIS设备的超声波检测频带通常在20~80 kHz。由于超声波传感器与GIS设备的电气回路之间无任何联系,因此超声波检测具有较强的抗电气干扰能力。超声波信号在GIS内部的传播方式复杂,一般分为通过SF₆气体到达检测传感器的直达波和通过SF₆气体到达筒壁,并沿GIS壳体传播的复合波两类^[16]。由于超声波信号在SF₆气体和壳体中的衰减较大,因此其检测范围有限。同时,超声波检测易于受到外部噪音和GIS气室振动的影响。

3)高频电流法。高频电流法(high frequency current transformer, HFCT)一般采用Rogowski线圈作为电流传感器,安装在设备接地线上检测局部放电所产生的高频电流信号^[17]。高频电流法检测方式简单,操作便捷,是电力变压器和高压电缆较为成熟的检测手段。由于GIS设备的空间尺寸跨度大,设备接地点众多,且接地引下线上的外部干扰信号较大,高频电流法的现场检测效果受到一定影响,主要应用于实验室内的检测和研究。

特高压GIS设备尺寸结构特殊,对制造、安装工艺要求高,尤其近年来发生了多起绝缘故障。针对不同的绝缘缺陷类型,其放电特征不同,带电检测

方法的检出有效性也不同^[18-20]。目前,对于1 100 kV GIS设备的绝缘带电检测效果尚缺乏系统评估。

为解决上述问题,支撑并指导1 100 kV GIS设备的带电检测工作,文中通过内部缺陷仿真分析和试验研究,对特高频、超声波和高频电流法3种局部放电带电检测方法的有效性进行了分析比较。

1 1 100 kV GIS设备内部缺陷模拟及仿真分析

1.1 1 100 kV GIS真型模拟平台

真型平台以1 100 kV GIS产品为原型,包含高压套管,以及L型单相母线腔体,见图1。



图1 1 100 kV GIS真型试验平台

Fig. 1 Real type testing platform of 1 100 kV GIS

为了研究1 100 kV GIS设备不同局部放电带电检测方法的检测效果,在GIS真型平台的不同气室上布置了多个特高频传感器、超声波传感器,并在接地线上安装了高频电流传感器,同时利用脉冲电流法局放仪进行对比分析,见图2。

1.2 内部缺陷模拟及仿真分析

文中在真型平台L型母线腔体的末端气室设置了电晕放电、悬浮放电、壳体颗粒放电、绝缘空隙放电和绝缘表面污秽放电共5种缺陷模型,模拟GIS设备的内部工艺缺陷或绝缘故障。

利用时域有限差分法(FDTD)分析工具对GIS缺陷进行仿真计算^[21-23]。网格剖分精度和计算精度详见表1。内部缺陷模型及仿真计算结果如下。

1.2.1 电晕放电缺陷

GIS制造安装过程中,难以排除尖角、毛刺、缝隙、切屑等杂质的存在。同时在GIS运行期间,也会由于磨损、开关动作等原因而产生杂质,这些杂质的存在会对GIS的稍不均匀场产生干扰。尖端放电模型选用直径约1.5 mm的铜丝,模拟在高压导电杆上的金属异物,铜丝长度约30 mm。

SF₆绝缘结构设计强调电场分布的均匀性及最高工作场强的控制,当电场强度小于绝缘件允许场强时,GIS设备就不会击穿而产生绝缘故障。根据设计经验,在SF₆表计气压0.4 MPa时,GIS设备中导体表面场强设计基准值为24 kV/mm,绝缘件表面为

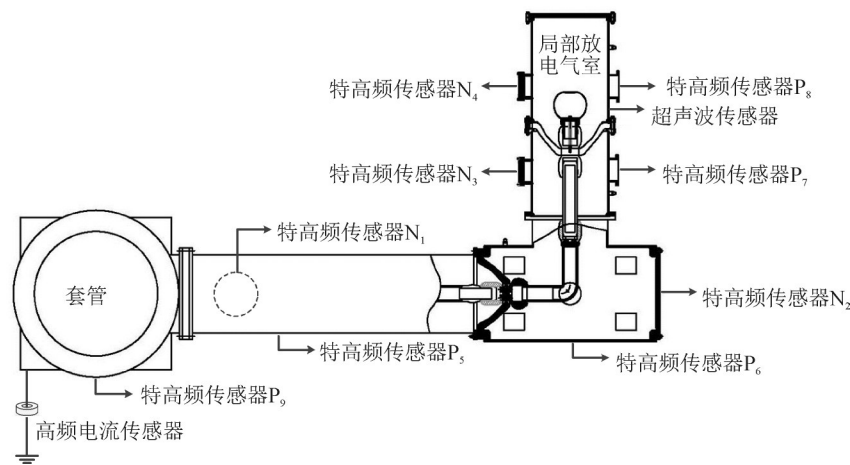


图2 真型试验平台传感器布置图

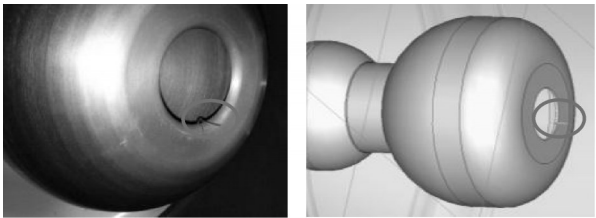
Fig. 2 The layout of partial discharge sensors on real type testing platform

表1 缺陷模型仿真计算参数

Table 1 Simulation and analysis parameters of defect models

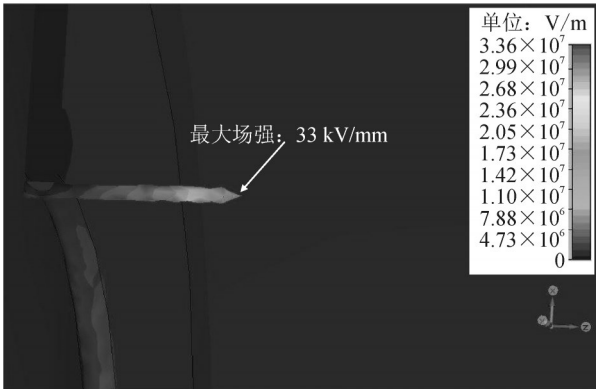
缺陷类型	剖分类型	剖分网格数量/个	最小剖分尺寸/mm	最大剖分尺寸/mm	计算精度/(kV·mm ⁻¹)
电晕放电	立方体	2 127 109	0.165 044 0	251.304	10 ⁻⁶
悬浮放电	立方体	2 112 483	0.165 044 0	251.304	10 ⁻⁶
壳体颗粒放电	立方体	2 122 229	0.002 314 8	251.304	10 ⁻⁶
绝缘空隙放电	立方体	2 143 184	0.144 162 0	251.304	10 ⁻⁶
表面污秽放电	立方体	2 142 819	0.144 162 0	251.304	10 ⁻⁶

12 kV/mm,绝缘内部及嵌件为3 kV/mm。经过仿真计算,尖端周围的最大电场强度达33 kV/mm,已经远超过设计要求。放电模型及仿真分析结果见图3。



(a) 模型布置

(b) 仿真建模



(c) 尖端周围电场分布

图3 尖端放电模型及仿真结果

Fig. 3 Tip discharge model and simulation result

1.2.2 悬浮放电缺陷

悬浮放电主要是由于GIS中有诸如螺丝松动、异物等情况,造成金属悬浮电位出现,导致局部电场畸变并诱发局部放电的现象。文中在靠近高压电极的位置,利用M18螺母模拟一个悬浮电极缺陷,螺母与高压电极间涂抹绝缘漆。

经过仿真计算,金属螺栓处电场发生明显的畸变,高压导体表面局部的电场强度达到36 kV/mm,已经远超过设计要求。放电模型及仿真分析结果见图4。

1.2.3 壳体颗粒放电缺陷

GIS中的自由颗粒是由设备安装过程中的工艺控制不良,或是开关动作导致的振动所引起。自由颗粒在气室绝缘和壳体间移动,并诱发放电故障。文中使用铜屑模拟壳体上的自由金属碎屑,铜屑的最大直径为1~3 mm,置于高压导体及屏蔽罩下方。

经过仿真计算,当颗粒跃起高度超过16 mm时,金属颗粒附近的电场强度最大约为1.6 kV/mm,接近绝缘内部场强的设计要求。放电模型及仿真分析结果见图5。

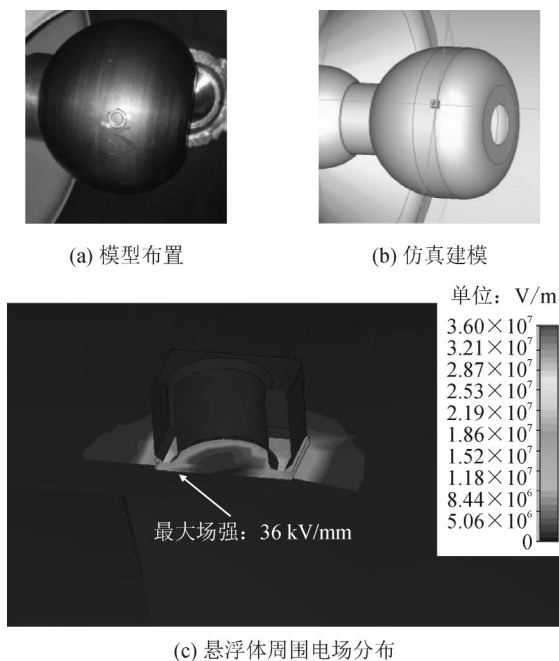


图4 悬浮电极放电模型及仿真结果

Fig. 4 Floating electrode discharge model and simulation result

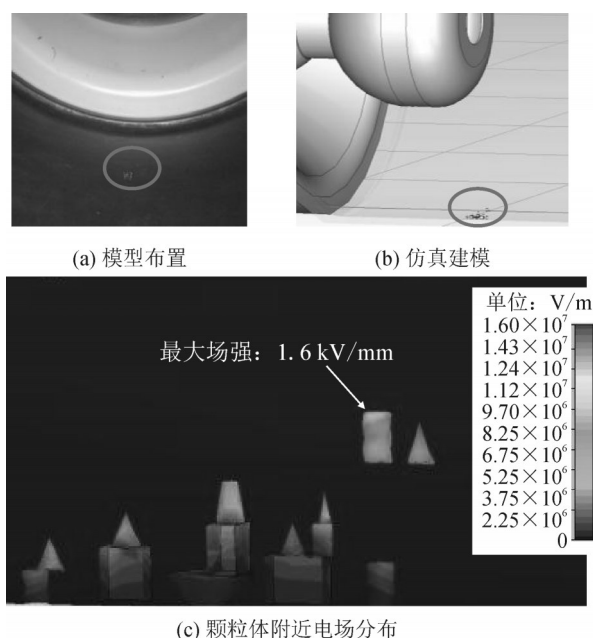


图5 壳体颗粒放电模型及仿真结果

Fig. 5 Mobilized metal particles discharge model and simulation result

1.2.4 绝缘空隙放电缺陷

GIS中的绝缘子多为环氧材料,采用真空浇注工艺制作。当浇注过程中混入气泡,或由于运行过程中受力发生内部断裂,就会形成内部空隙缺陷。为模拟真实绝缘子的内部空隙缺陷放电,文中制作了绝缘子内部空隙放电模型。在环氧树脂棒靠近高压导体端部设置了两个空气间隙,空隙直径 $\phi 5$ mm。

经过仿真计算,气隙模型处电场发生明显的畸变,气隙内的局部场强最大为 6.43 kV/mm,已经超

过固体绝缘内的设计要求。放电模型及仿真分析结果见图6。

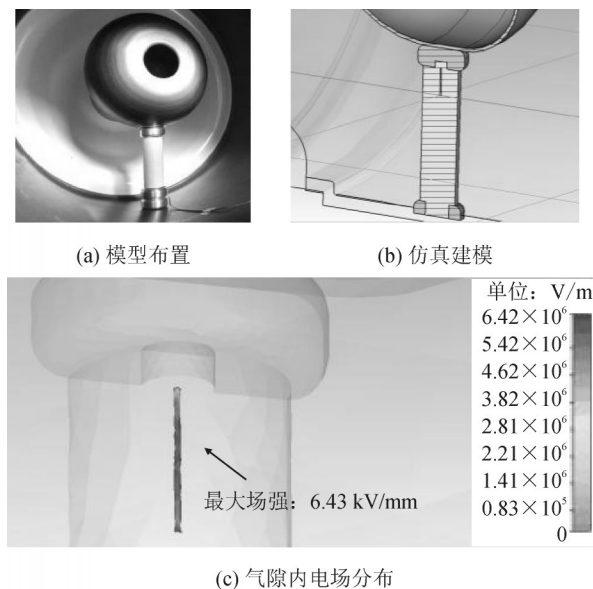


图6 绝缘空隙放电模型及仿真结果

Fig. 6 Air-gap discharge model of insulation and simulation result

1.2.5 绝缘表面污秽放电缺陷

绝缘子表面、高压导杆和SF₆气体之间的结合区域电场非常集中,如果绝缘子表面存在污秽等污染物,将加剧电场畸变。由GIS运行经验表明,沿支撑绝缘子表面闪络是GIS中的常见故障。文中在环氧树脂棒表面涂抹导电碳素,模拟绝缘表面污秽,碳素均匀环绕绝缘棒一周,宽度约45 mm。

经过仿真计算,污秽表面的电场强度最大为 10 kV/mm,已超过固体绝缘表面的设计要求。放电模型及仿真分析结果见图7。

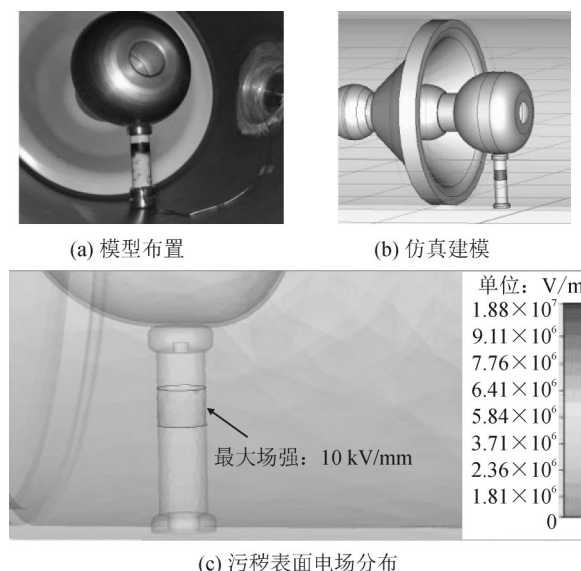


图7 绝缘表面污秽放电模型及仿真结果

Fig. 7 Contamination discharge model of insulation and simulation result

2 1 100 kV GIS设备内部缺陷试验研究

根据仿真计算结果,文中在1 100 kV GIS真型平台上对不同的缺陷模型进行了试验,监视并记录不同局部放电带电测试方法的测试结果。为复现高电压高场强下的局部放电特征,并验证不同检测方法的有效性,文中多次修正放电模型,使得试验条件接近运行工况。

试验中采用不同类型的带电检测仪器进行对比

测试,同时利用示波器监测不同类型传感器的测试结果。所用传感器的参数和检测仪型号详见表2。

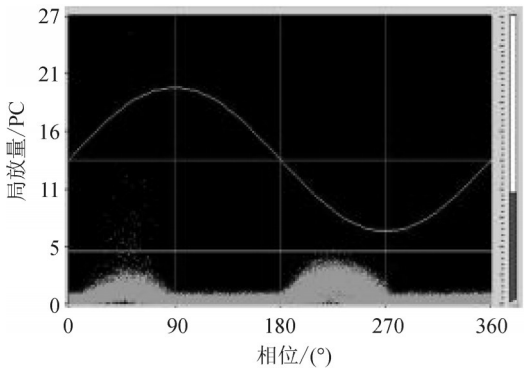
针对不同的放电模型,试验结果如下:

1)电晕放电缺陷试验。电晕放电缺陷模型在220 kV试验电压下,视在放电量13 pC,不同检测方法的试验图谱见图8。由脉冲电流法检测谱图可见,在工频周期正负半周峰值处,存在两簇明显的放电脉冲,负半周放电脉冲幅值较大,频率较密集,与高压端电晕放电缺陷的典型谱图相符。

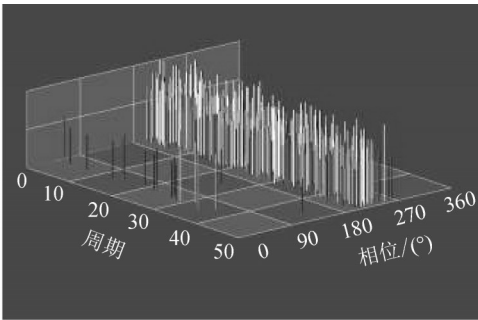
表2 不同类型局部放电传感器技术参数

Table 2 Parameters of different partial discharge sensors

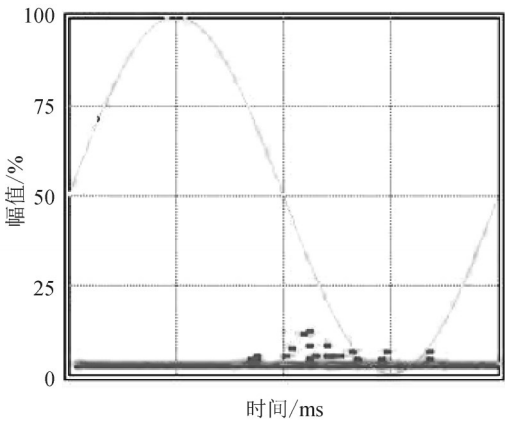
项目	特高频法	超声波法	高频电流法
传感器参数	等效高度:13.9 mm 检测频带:400 ~ 1 500 MHz	灵敏度:80 dB[V/(m·s ⁻¹)] 谐振频带:30 kHz 检测频带:25 ~ 70 kHz	传输阻抗:5.8 mV/mA 检测频带:2.5 ~ 50 MHz
检测仪型号	DMS	UHA	PD-CHECK
示波器参数		频带:4 GHz 采样率:20 GS/s	



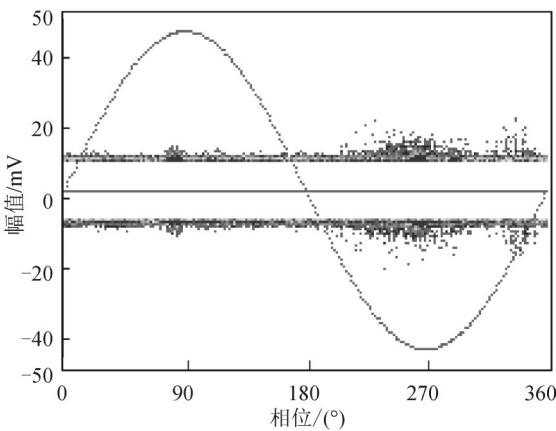
(a) 脉冲电流法



(b) 特高频法



(c) 超声波法



(d) 高频电流法

图8 电晕放电模型检测图谱

Fig. 8 Spectrums of tip discharge mode

特高频法和高频电流法的检测谱图与脉冲电流法相一致,超声波法对该放电类型的检测灵敏度相对较低,只检测到工频周期负半周的放电脉冲,

且信号幅值较小。

2)悬浮放电缺陷试验。悬浮放电缺陷模型在600 kV试验电压下,视在放电量550 pC,不同检测

方法的试验图谱见图9。脉冲电流法在工频周期的正

负半周检测到放电幅值相对稳定,相位对称的脉冲簇。

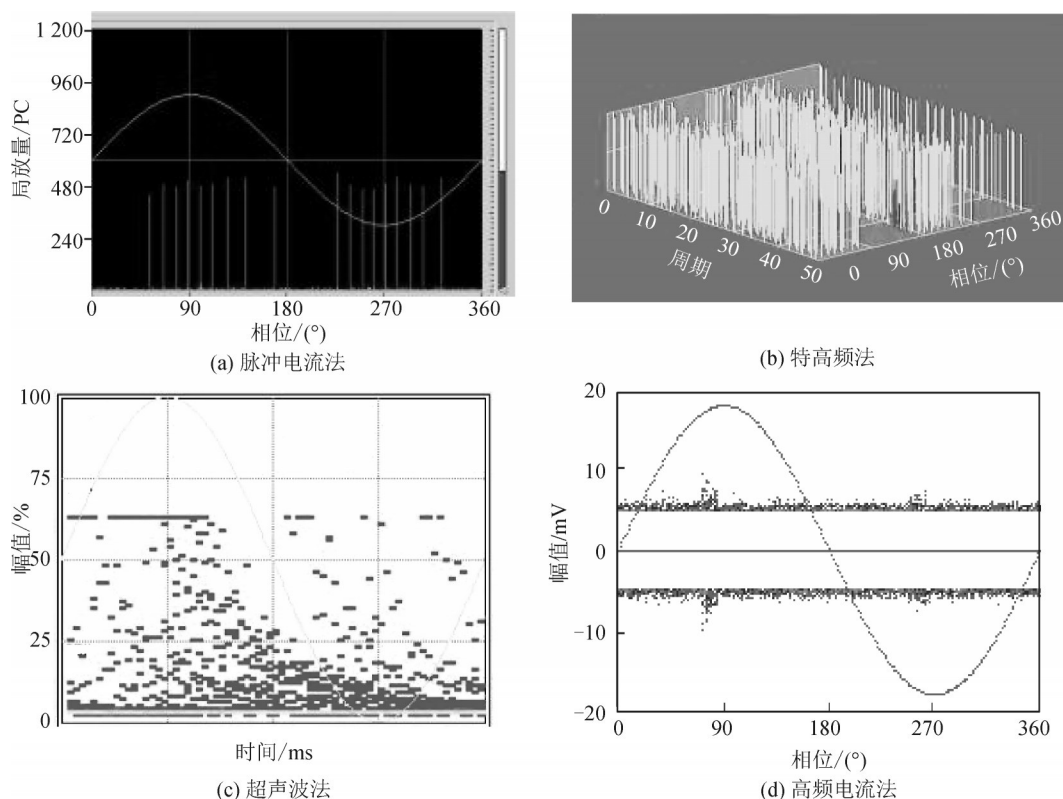


图9 悬浮放电模型检测图谱

Fig. 9 Spectrums of floating electrode discharge model

特高频法的检测谱图与脉冲电流法相一致,超声波法可以检测到明显的放电信号,相位分布在正负半周,但由于声波在高压端均压罩和GIS腔体内的反射和叠加,放电信号的幅值分布较为分散。高频电流法对该放电类型的检测灵敏度有限,在正负半周检测到的放电脉冲幅值和相位分布均较小。

3)壳体颗粒放电缺陷试验。壳体颗粒放电缺陷模型在762 kV试验电压下,视在放电量13 pC。不同检测方法的试验图谱见图10。脉冲电流法在工频周期内检测到幅值和相位均较为分散的放电信号。

特高频法检测到的多为偶发脉冲,放电幅值较小。超声波法检测到的放电信号幅值较大,在工频周期内相位分布分散。同样,高频电流法检测到的信号较为离散,负极性信号偏多。

4)空隙放电缺陷试验。绝缘空隙放电缺陷模型在670 kV试验电压下,视在放电量11 pC,不同检测方法的试验图谱见图11。由脉冲电流法的检测图谱可见,放电脉冲分布在第I和第III象限。可以判断在长气隙上存在两类放电信号,放电幅值不对称。A类放电信号的频次较多,且在第I象限幅值相对较低,在第III象限幅值相对较高,B类放电信号的频次较少,在第I、III象限幅值特征正好相反。

特高频法在第I、III象限检测到部分偶发脉

冲,与脉冲电流法检测图谱有一定的对应关系。超声波法对该放电类型的检测灵敏度不高,检测到的放电幅值较小。高频电流法检测到较为明显的A类放电信号,与脉冲电流法检测结果相对应。

5)污秽放电缺陷试验。污秽放电缺陷模型在210 kV试验电压下,视在放电量110 pC,不同检测方法的试验图谱见图12。脉冲电流法检测到放电信号,放电脉冲主要位于工频周期的第III象限。

特高频法和超声波法的检测谱图与脉冲电流法相一致,高频电流法对该放电类型的检测灵敏度较小,未测到放电信号。

通过上面的分析可以看出,在实验室环境下,3种带电检测方法与脉冲电流法的检测结果相比较,具有一定的对应关系,并对不同的内部缺陷放电敏感度不同。利用示波器记录各类传感器的输出波形,试验数据详见表3,典型的检测波形见图13。

3 局部放电带电检测有效性比较分析

根据试验结果,不同的内部缺陷模型有各自的放电特征。为更加直观、全面地对不同检测方法的有效性进行评价分析,文中采用了雷达图的评价方法^[24-25]。

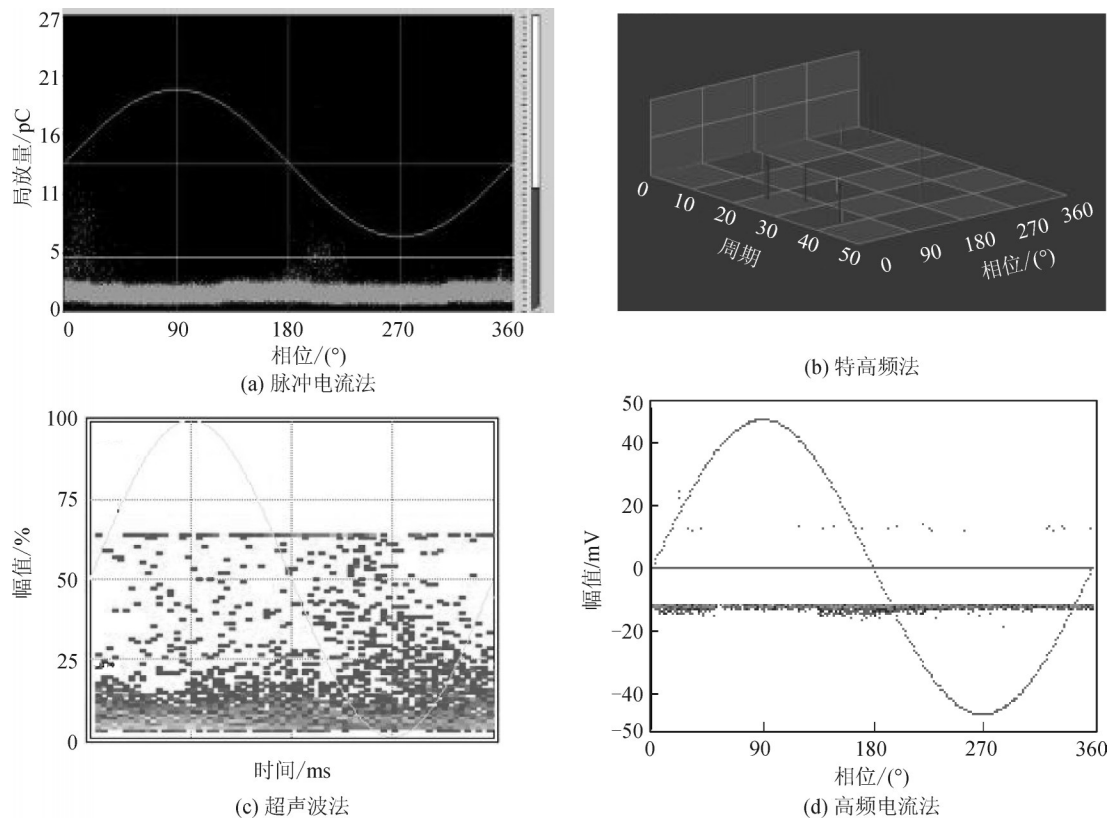


图10 壳体颗粒放电模型检测图谱

Fig. 10 Spectrums of mobilized metal particles discharge model

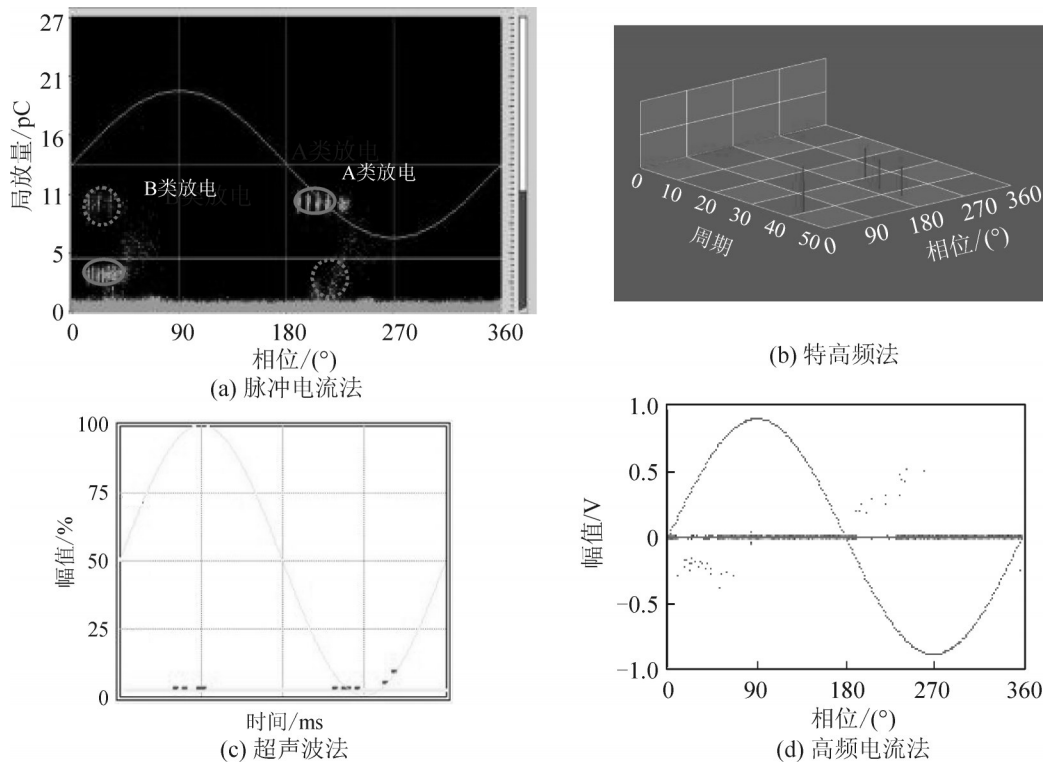


图11 空隙放电模型检测图谱

Fig. 11 Spectrums of air-gap discharge model

考虑到不同缺陷模型的测试电压、内部场强分布和实际放电量,以及不同检测方法的测试增益,首先对仿真结果进行了电压修正,并根据修正场强

对检测结果进行了归一化处理。文中以实验室常规脉冲电流法作为参照样本,建立了雷达图的评价矩阵 P_M ,其计算方法详见式(1)

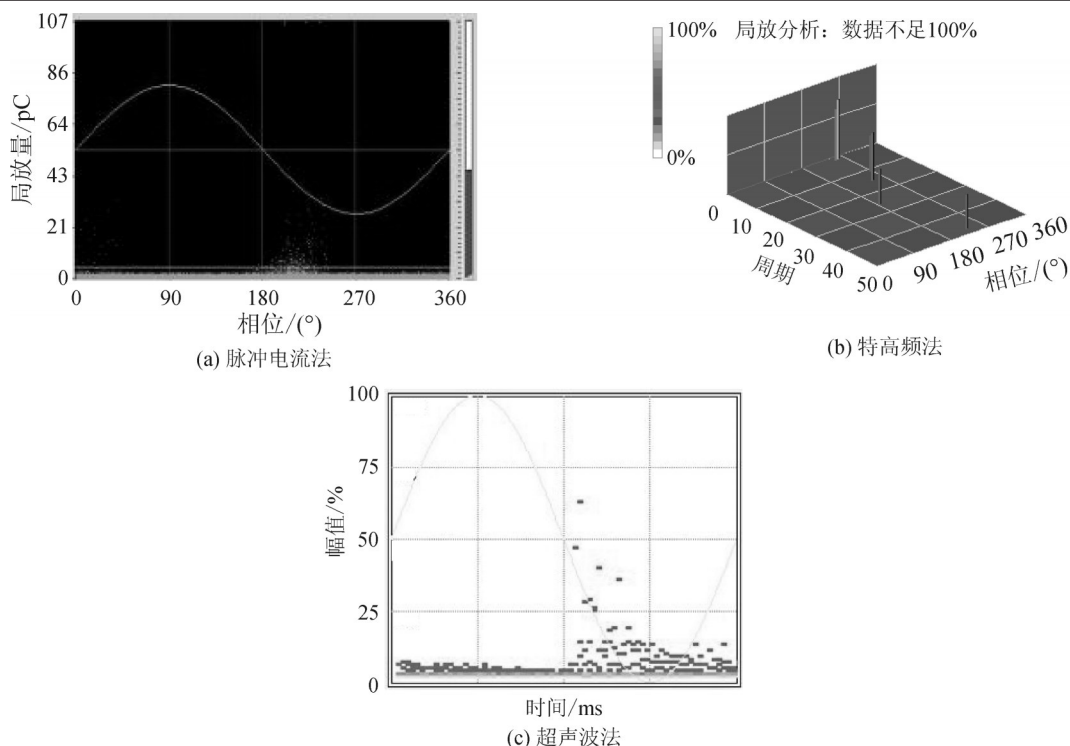


图12 污秽放电模型检测图谱

Fig. 12 Spectrums of contamination discharge model

表3 内部缺陷试验数据

Table 3 Internal defect test results

放电模型	试验电压/kV	视在放电量/pC	特高频		超声波		高频电流	
			测量值/V	增益/dB	测量值/V	增益/dB	测量值/V	增益/dB
尖端	220	13	0.76	40	0.010	40	0.020 0	0
悬浮	600	550	7.90	0	3.000	60	0.015 0	0
壳体颗粒	762	13	0.08	40	0.810	60	0.020 0	0
空隙	670	11	0.40	40	0.006	40	0.027 5	0
污秽	210	110	2.90	0	0.024	40	—	—

$$P_M(x) = \frac{U(x)}{A(x) \cdot E(x)} \quad (1)$$

式(1)中: x 为不同内部缺陷; U 为不同检测方法的测量值; A 为不同检测方法的检测增益; E 为不同缺陷的内部场强。 $A(x)$ 在计算时需要按照式(2), 将分贝值转化为绝对比值, $A_{dB}(x)$ 为检测增益的分贝值。

$$A(x) = 10^{\frac{A_{dB}(x)}{20}} \quad (2)$$

根据评价矩阵 P_M 绘制雷达图, 可以对 GIS 设备内部缺陷不同检测方法的检出有效性进行评价, 见图 14。

从图 14 中可以看出, 脉冲电流局放检测对各类缺陷放电均较为有效, 适合作为实验室局部放电的判定标准。但是受限于其检测特点和应用条件, 不适用于现场的局部放电带电检测。

特高频局放检测对各类内部缺陷放电均有一定的响应, 其中对绝缘表面污秽放电和悬浮放电响应值最大, 对于电晕放电响应值略小。这是由于电晕放电的电磁波频率较低, 通常小于 300 MHz, 对于特高频检测不敏感。

超声波局放检测对于壳体自由颗粒放电和悬浮放电的检测效果较好。这是由于声波在金属壳体中相较于在 SF_6 气体中的衰减较小, 且传感器表贴于 GIS 外壳, 对于壳体上的放电更为敏感。此外, 悬浮电极放电剧烈, 引起放电电源周围气体的急剧压缩, 产生较大的声脉冲波。

高频电流局放检测对于绝缘表面污秽放电不敏感, 对于其他的内部缺陷均有一定的检测灵敏度, 但是高频电流局放检测在现场应用中, 易于受到地网干扰信号的影响, 实际检测效果受到一定的影响。

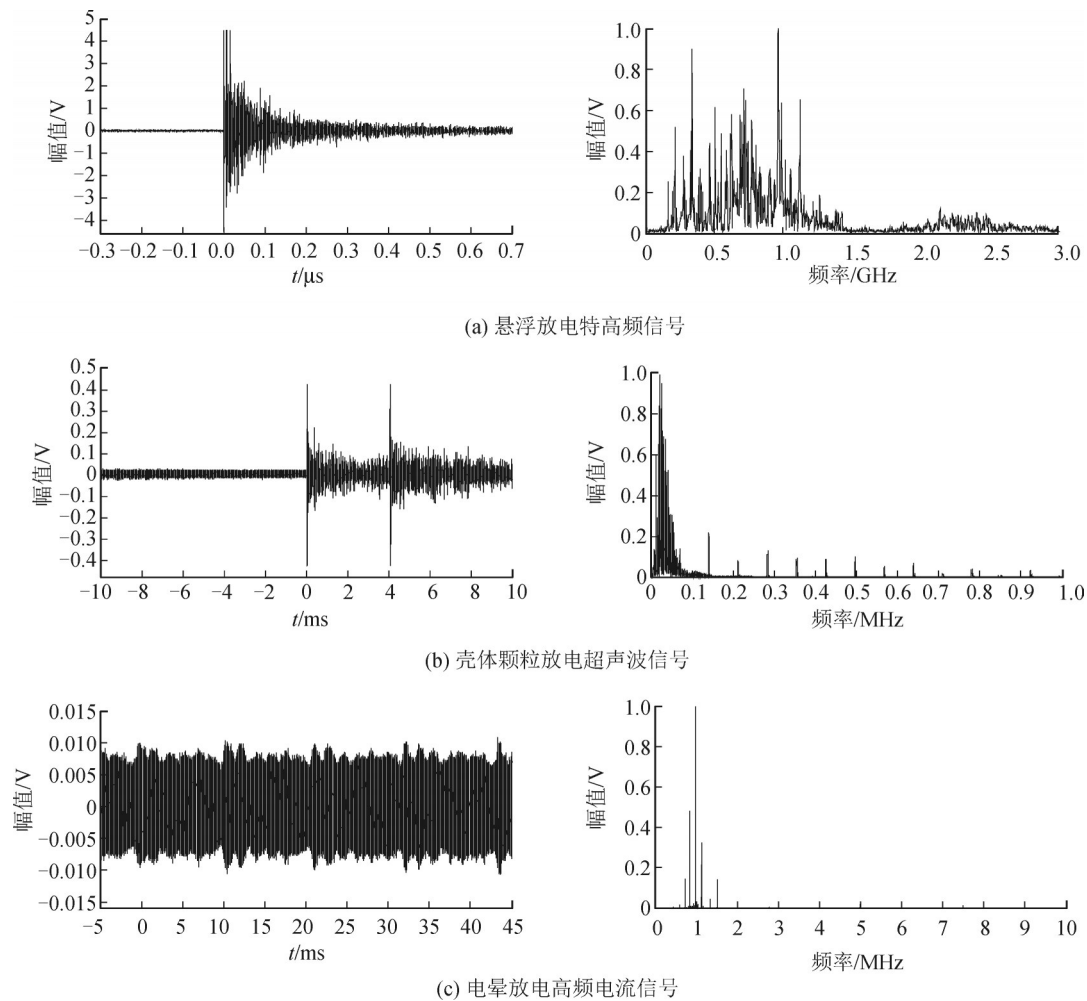


图13 典型的局部放电检测波形

Fig. 13 Typical waveforms of partial discharge

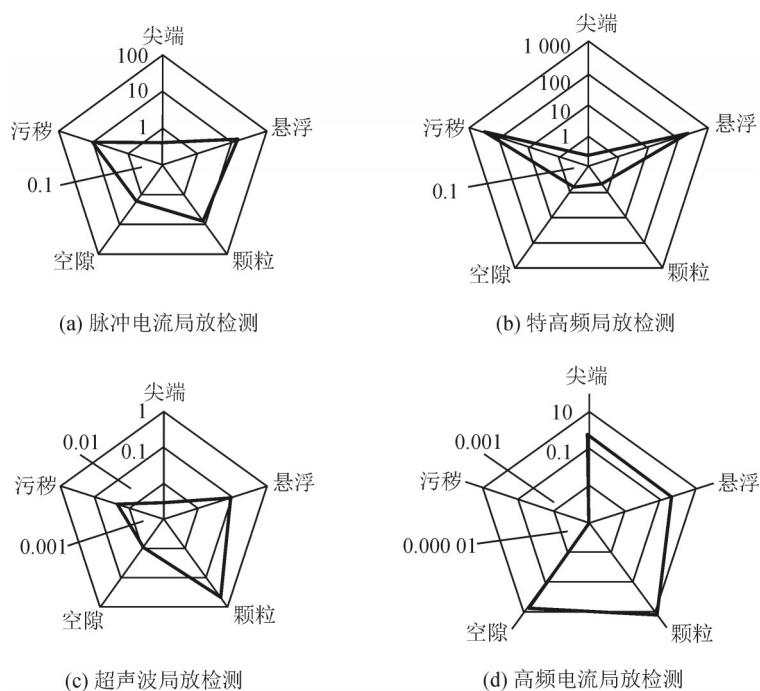


图14 不同检测方法对内部缺陷的检出有效性

Fig. 14 Effectiveness of different energized test methods

同上类似,以不同检测方法作为函数,建立内部缺陷的雷达图评价矩阵 P_F ,对不同内部缺陷的局部放电检测效果进行分析评价,见图15。

从图15中可以看出,尖端放电采用超声波检测效果不理想;悬浮电极放电采用特高频检测效果最

佳;壳体自由颗粒放电采用高频电流和超声波检测效果最好;绝缘空隙放电采用高频电流检测效果最优;绝缘表面污秽放电采用高频电流检测效果不理想。针对不同内部绝缘缺陷,各类带电检测方法的检测效果详见表4。

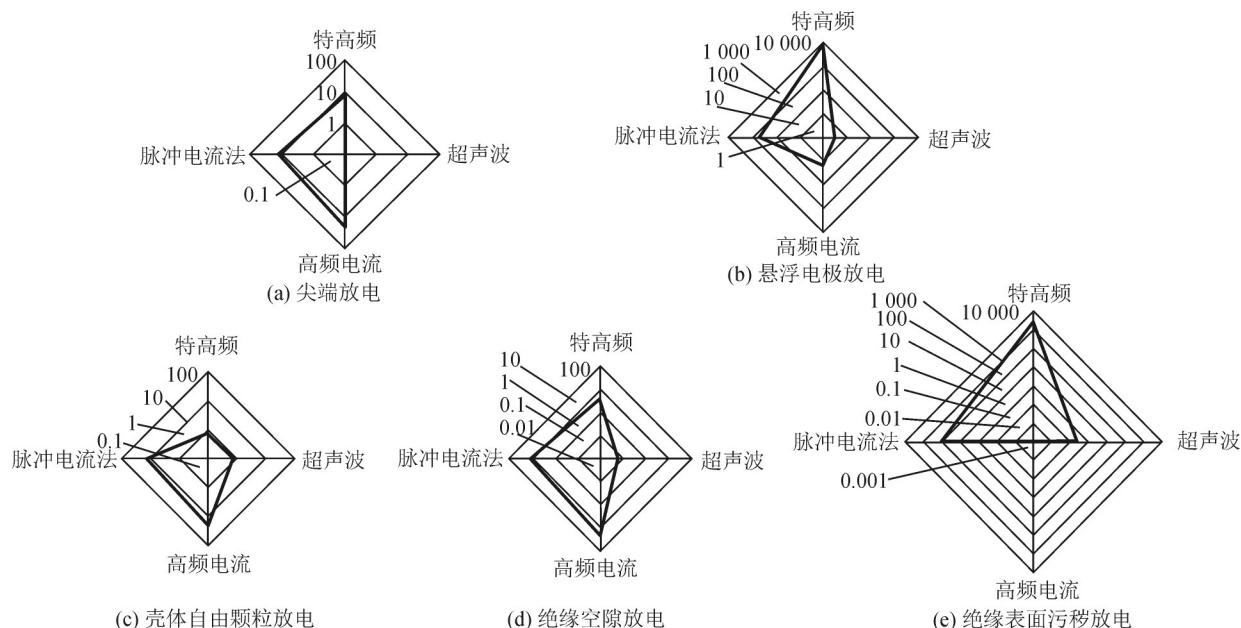


图15 不同内部缺陷的局部放电检测效果

Fig. 15 Test effect of different internal defects

表4 带电检测方法检测效果

Table 4 Test effect of energized test methods

内部缺陷	特高频法	超声波法	高频电流法
尖端放电	●	○	●
悬浮电极放电	●	●	●
壳体自有颗粒放电	●	●	●
绝缘空隙放电	●	●	●
绝缘表面污秽放电	●	●	○

注:●表示检测效果较好;●表示检测效果尚可;○表示检测效果不理想。

4 结论

文中依托真型试验平台,对1100 kV GIS设备内部缺陷进行了试验研究,并对局部放电带电检测技术的有效性进行了比较分析,可以得出如下结论:

1)在1100 kV GIS真型试验平台上设计了5类内部缺陷模型,其试验结论印证了仿真计算结果。不同的绝缘缺陷引起内部电场畸变,并诱发局部放电。由于缺陷的不同材质、位置和形态,其各自的放电特征不同;

2)提出了雷达图的评价方法,在实验室环境下对局部放电带电检测的有效性进行比较分析。特

高频局放检测对悬浮电极放电和绝缘污秽放电较为敏感;超声波局放检测对于壳体自由颗粒放电和悬浮电极放电效果较好;高频电流局放检测对绝缘表面污秽放电效果不明显,对于其他内部缺陷有一定检测效果;

3)在现场进行GIS设备局部放电带电检测工作时,外部干扰对检测的影响较大,尤其限制了高频电流法的实际应用。通过声电联合检测应用,开展多种检测方法和数据的综合分析,可以弥补单一检测方法的局限性。

文中的研究成果对于指导1100 kV GIS设备局部放电带电检测工作,促进多种检测技术的融合应用,积累了经验并提供了试验数据支撑。

参考文献:

- [1] 舒印彪. 1000 kV 交流特高压输电技术的研究与应用[J]. 电网技术, 2005, 29(19): 9-14.
SHU Yinbiao. 1000 kV UHV AC technology research and application[J]. Power System Technology, 2005, 29(19): 9-14.
- [2] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京: 中国经济出版社, 2005: 395-397.
LIU Zhenya. Ultra high voltage grid[M]. Beijing: China

- Economic Publishing House, 2005: 395-397.
- [3] 刘振亚. 特高压交流电气设备[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008: 1-7.
LIU Zhenya. UHV AC electrical equipment[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2008: 1-7.
- [4] 刘振亚. 特高压交直流电网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013: 7-23.
LIU Zhenya. Ultra-high voltage AC & DC grid[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2013: 7-23.
- [5] 崔博源, 王宁华, 王承玉, 等. 特高压气体绝缘金属封闭开关设备用盆式绝缘子的质量控制[J]. 高电压技术, 2014, 40(12): 3888-3894.
CUI Boyuan, WANG Ninghua, WANG Chengyu, et al. Quality control for basin insulator used in gas insulated metal enclosed switchgear of ultra high voltage[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(12): 3888-3894.
- [6] 王宇, 杨楚明, 林博楚. 气体绝缘金属封闭开关设备制造环节典型缺陷与关键点管控[J]. 广东电力, 2016, 29(8): 107-110.
WANG Yu, YANG Chuming, LIN Bochu. Typical defects and key points management for manufacturing chain of gas insulated metal enclosed switchgear[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(8): 107-110.
- [7] 罗学琛. SF₆气体绝缘全封闭组合电器(GIS) [M]. 北京: 中国电力出版社, 1999: 357-362.
LUO Xuechen. SF₆ gas insulated metal enclosed switchgear(GIS)[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999: 357-362.
- [8] 肖登明, 董越, 黄东海. 我国特高压输电工程的GIS技术[J]. 高电压技术, 2006, 32(12): 115-117.
XIAO Dengming, DONG Yue, HUANG Donghai. GIS technology of UHV transmission engineering in China[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(12): 115-117.
- [9] 李兴旺, 刘军, 刘梦娜. 一起气体绝缘金属封闭开关设备悬浮放电缺陷分析[J]. 高压电器, 2015, 51(10): 205-208.
LI Xingwang, LIU Jun, LIU Mengna. Analysis on a floating discharge defect in GIS disconnecting switch[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(10): 205-208.
- [10] PEARSON J S, FARISH O, HAMPTON B F, et al. Partial discharge diagnostics for gas - insulated substations[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1995, 2(5): 893-905.
- [11] BOGGS S A. Partial discharge: Overview and signal generation[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1990, 6(4): 33-39.
- [12] JUDD M D, FARISH O, HAMPTON B F. The excitation of UHF signals by partial discharges in GIS[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1996, 3(2): 213-228.
- [13] HOSHINO T, KATO K, HAYAKAWA N, et al. A novel technique for detecting electromagnetic wave caused by partial discharge in GIS[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(4): 545-551.
- [14] KAWADA M. Ultra wide band VHF/UHF radio interferometer system for detecting partial discharge source[C]//Power Engineering Society Winter Meeting. New York, USA: IEEE, 2002: 1482-1487.
- [15] SCHEI A, KYRKJEEIDE S, LARSEN V. Acoustic insulation analyzer for periodic condition assessment of Gas Insulated Substations[C]//Transmission & Distribution Conference & Exhibition: Asia Pacific IEEE/PES. Yokohama, Japan: IEEE, 2002: 919-924.
- [16] 刘君华, 姚明, 黄成军, 等. 采用声电联合法的GIS局部放电定位试验研究[J]. 高电压技术, 2009, 35(10): 2458-2463.
LIU Junhua, YAO Ming, HUANG Chengjun, et al. Experimental research on partial discharge localization in GIS using ultrasonic associated with electromagnetic wave method[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(10): 2458-2463.
- [17] KAWADA M, TUNGKANAWANICH A, KAWASAKI Z I, et al. Detection of wide-band E-M signals emitted from partial discharge occurring in GIS using wavelet transform[J]. IEEE Power & Energy Society, 2000, 15(2): 467-471.
- [18] 丁登伟, 唐诚, 高文胜, 等. GIS中典型局部放电的频谱特征及传播特性[J]. 高电压技术, 2014, 40(10): 3243-3251.
DING Dengwei, TANG Cheng, GAO Wensheng, et al. Frequency attributes and propagation properties of typical partial discharge in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(10): 3243-3251.
- [19] 刘君华, 郭灿新, 姚明, 等. 局部放电电磁波在GIS中传播路径的分析[J]. 高电压技术, 2009, 35(5): 1044-1048.
LIU Junhua, GUO Canxin, YAO Ming, et al. Analysis on the propagation routes of electromagnetic waves of partial discharge in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(5): 1044-1048.
- [20] 刘君华, 姚明, 黄成军, 等. GIS中局部放电电磁波的模式特性[J]. 高电压技术, 2009, 35(7): 1654-1660.
LIU Junhua, YAO Ming, HUANG Chengjun, et al. Characteristics of PD EM-wave modes in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(7): 1654-1660.
- [21] 丁然, 田野, 任红向, 等. 气隙局部放电模型改进及仿真[J]. 高电压技术, 2016, 42(12): 3934-3940.
DING Ran, TIAN Ye, REN Hongxiang, et al. Improved model and simulation of partial discharge in void[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(12): 3934-3940.
- [22] JUDD M D, HAMPTON B F, FARISH O. Modelling partial discharge excitation of UHF signals in waveguide struc-

- simulation and vortex structure analysis of multi-nozzle jet pumps[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(2): 136-140.
- [18] 沈 洋. 基于动网格技术的高速液压缸动态过程流场数值模拟[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2013.
- SHEN Yang. Numerical simulation of high speed hydraulic cylinder dynamic process flow field based on dynamic mesh technology[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2013.
- [19] 隋洪涛, 李鹏飞, 马世虎, 等. 精通CFD动网格工程仿真与案例实战[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2013.
- SUI Hongtao, LI Pengfei, MA Shihu, et al. Dynamic grid engineering simulation and case of actual combat[M]. Beijing: The People's Posts and Telecommunications Press, 2013.
- [20] 姜 旭, 贾申利, 李兴文, 等. 基于真实气体模型的SF₆断路器中冷态气流场特性的仿真分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(7): 167-173.
- JIANG Xu, JIA Shenli, LI Xingwen, et al. Simulation and analysis of cold flow field characteristics in SF₆ circuit breakers with UDRGM[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 167-173.
- [21] 李俐莹, 刘晓明, 邹积岩. 高压SF₆断路器能量分离喷口区域的气流参数特性[J]. 高电压技术, 2015, 41(9): 3123-3129.
- LI Liying, LIU Xiaoming, ZOU Jiyan. Gas flow characteristics of high voltage SF₆ circuit breaker with energy separated nozzle[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(9): 3123-3129.
- [22] 张 权, 杨 芳, 祁海洋, 等. 直流条件下空气与SF₆喷口电弧换热机理分析[J]. 高压电器, 2016, 52(12): 41-47.
- ZHANG Quan, YANG Fang, QI Haiyang, et al. Analysis of the energy transport processes in DC air and SF₆ nozzle arcs [J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(12): 41-47.
- 方春恩(1975—), 男, 教授, 研究方向为智能化开关电器理论及应用。
- 常晓丹(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能化开关电器理论及应用(通讯作者)。

(上接第47页)

- tures using Green's functions[J]. IEE Proc. Sci. Meas. Technol., 1996, 143(1): 63-70.
- [23] OKABE S, YUASA S, KANEKO S, et al. Simulation of propagation characteristics of higher order mode electromagnetic waves in GIS[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 13(4): 855-861.
- [24] 郑惠莉, 刘 陈, 翟丹妮. 基于雷达图的综合评价方法[J]. 南京邮电学院学报, 2001, 21(2): 75-79.
- ZHENG Huili, LIU Chen, ZHAI Danni. Comprehensive evaluating method based on radar-graph[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2001, 21(2): 75-79.
- [25] 吴 翔, 何怡刚, 张大波, 等. 基于最优权重与雷达图的变压器状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 55-60.
- WU Xiang, HE Yigang, ZHANG Dabo, et al. Transformer condition assessment based on optimal weight and radar map[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 55-60.
- 杨 宁(1986—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事电力设备状态检修与故障诊断技术方面的研究工作。