

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201612005



高压开关柜内部气隙放电模型 及其电场分析

许超¹, 尚荣艳¹, 艾春², 毛恒²

(1. 华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021;
2. 厦门红相电力设备股份有限公司 研发中心, 福建 厦门 361000)

摘要: 针对高压开关柜中典型的内部气隙放电, 建立内部气隙放电有限元分析模型. 通过气隙处电场分析, 得到该模型的电晕起始电压和电晕层厚度, 并研究气隙模型参数对内部气隙处电场分布变化的规律. 在此基础上, 研制出内部气隙放电模型实物, 并搭建高压开关柜局部放电模拟试验平台, 测量内部气隙放电模型的电晕起始电压. 结果表明: 实验结果与仿真结果相近, 证明模型有限元分析及实物研制的一致性.

关键词: 高压开关柜; 内部气隙放电; 电场分析; 绝缘缺陷; 局部放电

中图分类号: TM 835; TM 851 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2018)06-0913-07

Air-Gap Discharge Model and Electric Field Analysis of High-Voltage Switchgear

XU Chao¹, SHANG Rongyan¹, AI Chun², MAO Heng²

(1. College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
2. Research and Development Center, Xiamen Red Phase Instruments Incorporation, Xiamen 361000, China)

Abstract: Aiming at the typical air-gap discharge in high-voltage switchgear, the finite element analysis model of the air-gap discharge was established, the corona inception voltage and corona layer thickness of the model were obtained by the electric field analysis at the air-gap model, meanwhile, the impact and the variation of the electric field distribution at the air-gap was studied by the model parameter. On this foundation, air-gap discharge model is developed. Finally, simulation test platform of the high-voltage switcher partial discharge was built to measure the corona inception voltage of the air-gap discharge model. The results show that the experimental results are in good agreement with the simulation results, which proves the consistency of the model finite element analysis and the developed model.

Keywords: high-voltage switchgear; air-gap discharge; electric field analysis; insulation defect; partial discharge

高压开关柜作为电力系统中典型的配电设备, 发生局部放电现象是导致绝缘老化或劣化甚至损坏, 从而引发设备损坏及电力系统事故的重要原因之一^[1-3]. 目前, 利用脉冲电流法、超高频法(UHF)、超声波(AE)或暂态地电压检测法(TEV)等局部放电检测技术^[4-6], 可以带电检测高压开关柜的局部放电特征. 检测不必嵌入设备, 且不必停电, 是预防开关柜故障的一种好方法. 然而, 局部放电检测技术发展并

收稿日期: 2016-12-02
通信作者: 尚荣艳(1975-), 女, 讲师, 博士, 主要从事电气装置状态监测与故障诊断的研究. E-mail: 261756758@163.com.
基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(51477058); 福建省厦门市科技计划项目(3502720153029)

不完善,目前仍是研究的热点^[7-14].检测方法是否准确有效,检测仪器质量是否可靠,都需通过功能性与有效性验证试验进行验证.设计局部放电缺陷模型,仿真放电过程,分析放电机理和预测放电参数是实验的重要环节,直接影响实验的正确性与准确性.因此,本文以内部气隙放电模型为研究对象,对其进行结构设计,并通过有限元分析其电场特性.

1 内部气隙放电模型的设计

1.1 高压开关柜的内部气隙放电机理

内部气隙放电是开关柜局部放电类型中最常见,也是最典型的一种放电类型.开关柜内部气隙放电情形与等效电路,如图 1 所示.气泡厚度为 δ ,整个绝缘介质的厚度为 d ,通过该等效电路可进行气隙放电机理研究.图 1 中:设置绝缘介质中的气泡为 c,其电阻与电容分别为 R_c, C_c ;与气泡串联的介质部分为 b,其电阻与电容分别为 R_b, C_b ;其余介质为 a,其电阻与电容分别为 R_a, C_a ^[15].通过平板电极向绝缘介质施加电压,根据电路理论,可得

$$\frac{u_c}{u_b} = \frac{\sqrt{(1/R_b)^2 + (\omega C_b)^2}}{\sqrt{(1/R_c)^2 + (\omega C_c)^2}} \approx \frac{\omega C_b}{\omega C_c} = \frac{\epsilon_b \delta}{\epsilon_c (d - \delta)}.$$

(1)

由于气泡内的放电频率可达吉赫(GHz),所以电阻对放电脉冲的阻抗将远远大于容性阻抗,则电阻的倒数将远小于容性阻抗的倒数,电阻部分在计算时可略去不计,得到式(1)结果,从而可得气泡 c 和绝缘介质 b 上的场强关系为

$$\frac{E_c}{E_b} = \frac{u_c / \delta}{u_b / (d - \delta)} = \frac{\epsilon_b}{\epsilon_c}.$$

(2)

式(2)中: ϵ_b, ϵ_c 分别表示绝缘介质 b 与气泡 c 的相对介电常数.

由式(1),(2)可知:在同样的电场环境下,绝缘气隙中的电场强度是绝缘介质中电场强度的 ϵ_b/ϵ_c 倍;由于 ϵ_b/ϵ_c ,则 $E_c > E_b$;由于气隙很小,其击穿电压将小于绝缘介质中的击穿电压.因此,对含有气隙的绝缘介质施加高压时,气隙将先于绝缘介质被击穿,但由于绝缘介质其他部位未击穿,致使两电极间没有形成固定的放电通道,从而发生局部放电^[16-18].由 DL/T 417—2006《电力设备局部放电现场测量导则》可知:气隙放电的相位一般集中在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 及 $180^\circ \sim 270^\circ$ 上对称分布.这可作为开关柜发生内部气隙放电的判据.

此外,内部气隙放电具有极不均匀电场特征,如内部气隙长度、气隙宽度、气隙厚度、气隙的边缘倒角等因素都会对内部气隙放电起始电压产生影响.此外,开关柜内部气隙部位结构复杂,进行电场计算分析非常困难.因此,有必要建立简单的电场有限元分析模型.

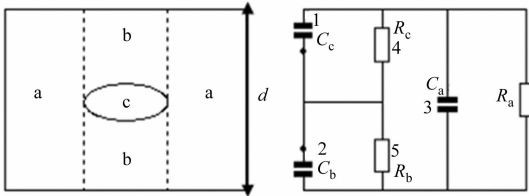
1.2 内部气隙放电有限元分析模型

借鉴其他研究者使用的内部气隙放电实验装置^[18],设计的内部气隙放电模型结构,如图 2 所示.

内部气隙放电区域用有机玻璃密封,可减小空气湿度及流动速度的影响.根据内部气隙放电模型结构,采用 ANSYS 的 Maxwell 模块,搭建内部气隙放电 3D 模型,如图 3 所示.

内部气隙放电仿真模型,如图 4 所示.环氧树脂圆板模型(图 4(a)),厚度为 3 mm,宽度为 20 mm,长度为 40 mm.气泡为扁平状(图 4(b)),内嵌于环氧树脂圆板模型中,宽度为 L ,长度为 $2L$,厚度为 H ,边沿倒角为 R_1 (调节 L, H, R_1 的参数值,改变气隙形状,探究不同形状对气隙场强的影响).实验过程,逐步加载电压,直至气隙出现放电.

电晕起始场强 E_c 与电源频率无关,且直流电压下的 E_c 的极性效应不大(负极性下的稍低于正极性),数值和工频电压下的基本相同^[19].因此,求解器选用静电场.



(a) 放电情形 (b) 等效电路

图 1 内部气隙放电情形与等效电路

Fig. 1 Case of air-gap discharge and equivalent circuit

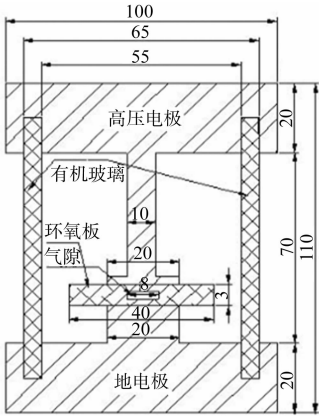


图 2 内部气隙放电模型结构(单位:mm)

Fig. 2 Structure of air-gap discharge model (unit: mm)

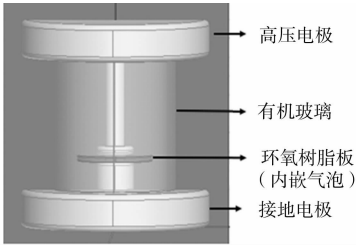


图 3 内部气隙放电有限元分析 3D 模型

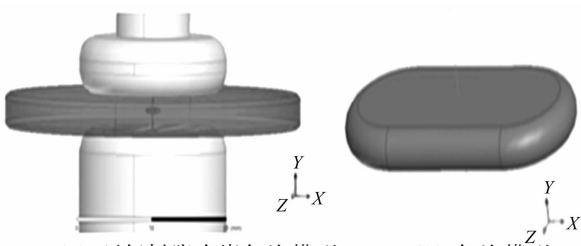


图 4 内部气隙放电仿真模型

Fig. 3 3D model of finite element analysis for air-gap discharge Fig. 4 Air-gap discharge simulation model

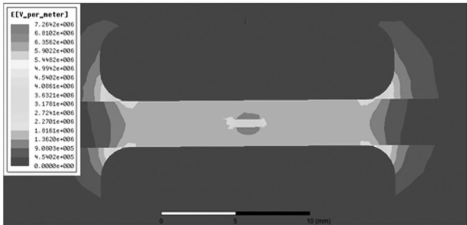
激励源和边界条件:1) 以空气 Air/SF₆ 作为空间介质,建立长方体空气外围,将外表面电势值设 0 V 作为参考点,模拟无限远大地;2) 高压电极加载 5 kV 作为参考值进行仿真计算,下端铜板电极接地;3) 接地电极电势值设为 0 V.

2 内部气隙放电模型的电场分析

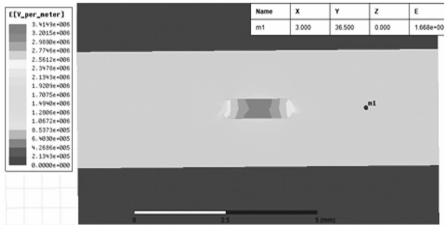
2.1 非内部气隙处电场分析

为了保证模型只在内部气隙处发生放电,其他地方不发生放电,必须消除内部气隙放电模型棱角、毛刺及其他可能导致放电的凸起.而有限元也可以仿真非内部气隙处电场,减小非内部气隙处放电引起局部放电检测技术误判的可能性.

对上、下两块电极板及气隙模型($L=1\text{ mm}$, $H=0.5\text{ mm}$, $R_1=0.25\text{ mm}$)进行电场分析,电极倒角 $R=2\text{ mm}$,模型上端板加载 5 kV 作为参考值进行仿真计算,下端接地.内部气隙放电模型场强分布,如图 5 所示.由图 5 可知:1) 场强最大处出现在高压电极倒角与环氧树脂板间的倒角气隙,最大处为 $7.26\text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$,按理想空气的判据,可计算出起始放电电压为 2.07 kV;气泡处场强为 $3.41\text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$,按理想空气的判据,可计算出起始放电电压为 4.39 kV;2) 加压过程中,高压电极与环氧树脂板的倒角气隙先发生电晕放电;3) 为避免非内部气隙处放电引起局部放电检测技术误判,此模型需放于 SF₆ 环境下,如表 1 所示.表 1 中: $E_{50\%}$ 为导体在雷电冲击负极性电压下的 50% 击穿场强; E_B 为耐受场强; E_1 为允许雷电冲击的合理场强值.以 SF₆ 相对压力为 4 个大气压(SF₆ 表计气压为 0.4 MPa)作为试验环境,按 4 个大气压 SF₆ 的判据,可计算出倒角气隙处电晕起始放电电压为 9.6 kV.因此,文中所有的仿真,起始放电电压都应在 9.6 kV 以下才有意义.



(a) 模型



(b) 气隙处

图 5 内部气隙放电模型场强分布

Fig. 5 Field distribution of air-gap discharge model

表 1 不同 SF₆ 气压时光洁导体场强设计基准值

Tab. 1 Field strength design standard of clean conductor at different SF₆ pressure

SF ₆ 表计气压/MPa	$E_{50\%}/\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$	$E_B/\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$	$E_1/\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$
0	8.7	7.4	6.3
0.1	15.0	12.8	11.0
0.2	21.3	18.1	15.5
0.3	27.6	23.6	20.0
0.4	33.9	28.8	24.0
0.5	40.2	34.2	29.0

2.2 不同参数对电场分布的影响

2.2.1 不同长度/宽度对电场分布的影响 以气隙模型厚度 $H=0.3\text{ mm}$,倒角 $H/2=0.15\text{ mm}$ 为定量,探究不同长度/宽度(垂直电力线方向)时,气泡处的场强分布. 输入电压为 5 kV ,以 0.5 mm 为宽度步长,设置 9 组气隙模型. 模型宽度 L 分别为 $0.5,1.0,1.5,2.0,2.5,3.0,3.5,4.0,10.0\text{ mm}$. 仿真得出气泡处的场强分布,如图 6 所示. 图 6 中:横轴坐标是沿电力线方向,以气隙正上方 2.5 mm 为起点,气隙正下方 2.5 mm 为终点的直线场强分布. 由图 6 可知:在气隙厚度不变的时候,垂直于电力线方向面积 S 足够小时,气隙长度、宽度越大,气隙处的场强畸变越严重,气隙内电场强度越来越大;垂直于电力线方向面积 S 足够大时,气隙长度、宽度越大,气隙内电场强度基本不再变化;相对于其他介质电容,当前模型物理结构尺寸的设定,建模气隙等效分布电容不够大,随着气隙垂直电场线的面积增大,呈现气隙场强变大的趋势;当气隙面积增大到一定程度,气隙电容远大于其他介质电容后, $E_{\text{气隙}}/E_{\text{环氧树脂}}=\epsilon_{\text{环氧树脂}}/\epsilon_{\text{气隙}}$,满足理论分析结果,其中, $\epsilon_{\text{环氧树脂}}$, $\epsilon_{\text{气隙}}$ 表示环氧树脂与气隙的相对介电常数.

2.2.2 不同厚度对电场分布的影响 气隙长度 $2L=8\text{ mm}$,宽度 $L=4\text{ mm}$,倒角为 $H/2$,探究厚度(垂直电力线方向)不同时,气隙处的场强分布. 输入电压为 5 kV ,以 0.1 mm 为厚度步长,设置 9 组气隙模型,模型厚度 H 分别为 $0.2,0.3,0.4,0.5,0.6,0.7,0.8,0.9,1.0\text{ mm}$. 仿真得出气隙处的场强分布,如图 7 所示. 由图 7 可知:在气隙长度和宽度一定的时候(气隙电容远大于其他介质电容),厚度越薄,气隙处的场强畸变越严重,气隙的起始放电电压越低;当气隙越来越厚,场强畸变减弱,气隙的场强趋近于 $E_{\text{气隙}}/E_{\text{环氧树脂}}=\epsilon_{\text{环氧树脂}}/\epsilon_{\text{气隙}}$,满足理论分析结果.

2.2.3 不同边沿倒角对电场分布的影响 气隙长度 $2L=8\text{ mm}$,宽度 $L=4\text{ mm}$,厚度 $H=0.5\text{ mm}$,探究边沿倒角 R_1 不同时,气隙处的场强分布. 加载 5 kV 输入电压,以 0.05 mm 为倒角步长设置 6 组气隙模型,边沿倒角 R_1 分别为 $0,0.05,0.10,0.15,0.20,0.25\text{ mm}$. 仿真得出气隙处的场强分布,如图 8 所示. 由图 8 可知:气隙模型的场强主要取决于电力线方向的厚度大小和垂直于电力方向长度、宽度的大小,其长度宽度厚度一定时,不同边缘倒角对其气隙场强影响并不是很大.

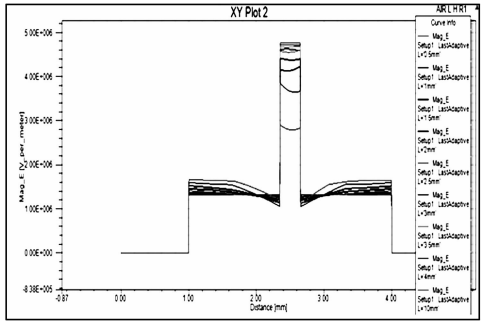


图 6 不同宽度 L 气隙处场强分布折线图
Fig. 6 Line intensity distribution of air-gap model at different widths L

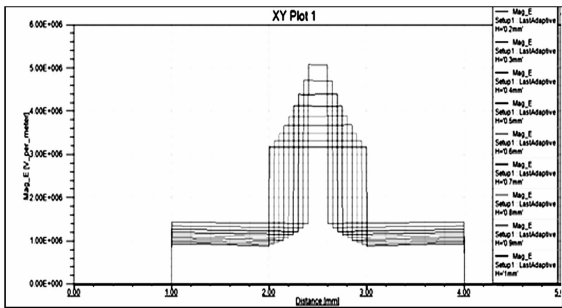


图 7 不同厚度 H 气隙处场强分布折线图
Fig. 7 Line intensity distribution of air-gap model at different thickness H

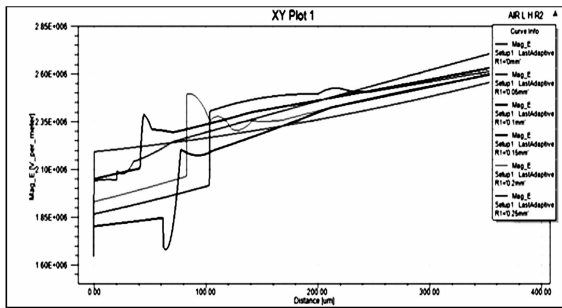
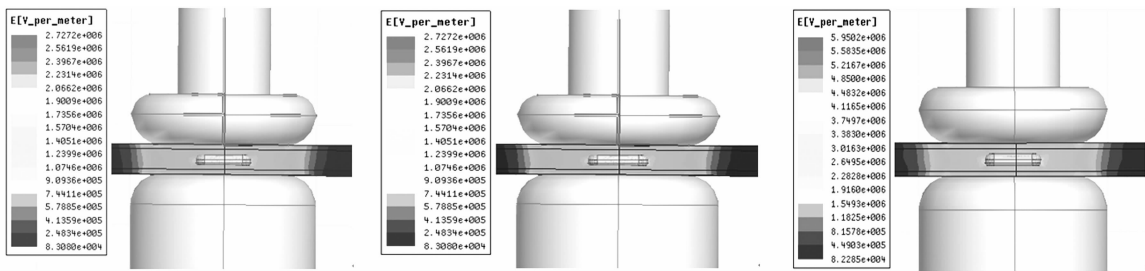


图 8 不同边沿倒角 R_1 气隙处场强分布折线图
Fig. 8 Line intensity distribution of air-gap model at different edge chamfer R_1

2.3 内部气隙处电场分析

产生电晕的主要原因是内部气隙局部区域的电场强度超过了电介质的耐电强度. 在气压为 0.4 MPa 下,理想 SF_6 气体的击穿强度为 $2.4\times 10^7\text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$,不妨令其作为有限元分析时发生电晕的条件,电场强度大于 $2.4\times 10^7\text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$ 的区域为放电区域. 内部气隙模型采用环氧树脂板内嵌气泡进行试验. 为满足气隙放电模型理论分析结果,以气泡长度、宽度、倒角及厚度为单一变量,研究其对气隙处电场分布变化的规律. 设置气隙模型厚度 $H=1\text{ mm}$,宽度 $L=4\text{ mm}$,长度 $2L=8\text{ mm}$,边缘倒角 $R_1=0.5\text{ mm}$. 通过向模型高压电极加载电压,可得到不同电压时内部气隙的场强分布情况,如图 9 所示.

改变高压电极的电压 U_e ,得到内部气隙(气泡)及倒角气隙处的最大场强 E_{max} 及电晕层厚度 δ_e ,如



(a) 电晕起始

(b) 电晕发展

(c) 倒角气隙电晕放电时

图 9 内部气隙的场强分布

Fig. 9 Field intensity distribution of air-gap model

表 2 所示。由表 2 可知:内部气隙及倒角气隙处的最大场强与施加电压成线性,随着电压的增大,最大场强越大;在相同施加电压下,倒角气隙处最大场强大于内部气隙处。

最大场强与施加电压的关系,如图 10 所示。由图 10 可知:内部气隙及倒角气隙处的电晕层厚度随着电压的增大而增大。

电晕层厚度与施加电压的关系,如图 11 所示。由图 11 可知:在加压过程中,内部气隙放电将产生伴生现象,即在一定施加电压下,内部气隙较倒角气隙放电明显,检测结果可靠,超过一定施加电压时,倒角气隙处电晕放电将覆盖内部气隙放电,检测结果误差较大。因此,试验中需将施加电压控制在一定范围内进行才有意义。

表 2 最大场强及电晕层厚度

Tab. 2 Maximum electric field strength and corona layer thickness

放电位置	U_e/kV	$E_{\max}/\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$	δ_c/mm	放电位置	U_e/kV	$E_{\max}/\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$	δ_c/mm
内部气隙 (气泡)处	4.00	2.47	不放电	倒角 气隙处	4.40	11.29	不放电
	4.40	2.72	极小		5.00	12.83	不放电
	4.70	2.91	极小		9.60	24.63	极小
	7.00	4.33	极小		10.00	25.61	0.2
	9.60	5.95	0.2		14.04	36.02	1.8
	12.50	7.74	0.6		15.00	38.49	2.4
	14.04	8.70	0.8		20.00	51.23	击穿
	15.00	9.29	0.9				
	20.00	18.59	1.5				

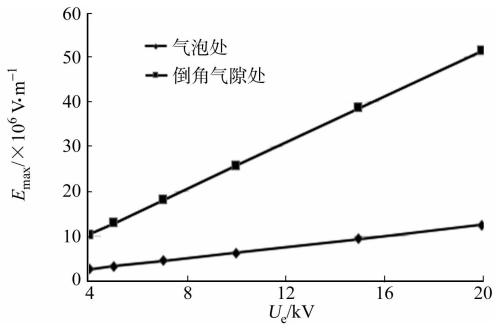


图 10 最大场强与施加电压的关系

Fig. 10 Relationship between maximum electric field strength and applied voltage

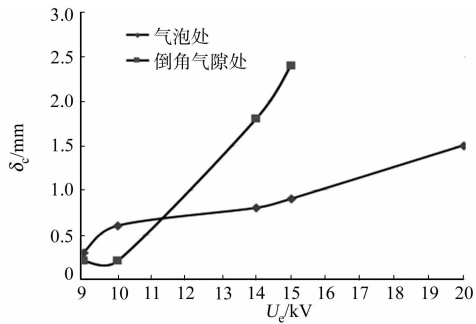


图 11 电晕层厚度与施加电压的关系

Fig. 11 Relationship between thickness of corona layer and applied voltage

3 电晕起始电压验证

3.1 内部气隙放电模型实物的研制

根据内部气隙放电有限元分析模型,研制出内部气隙放电模型实物,内部气隙模型内嵌于环氧树脂圆板中。

3.2 试验平台的搭建

选择测量电晕起始电压验证仿真结果. 搭建的高压开关柜局部放电模拟试验平台, 如图 12 所示. 图 12 中: 交流电源为 380 V 三相工频交流电源; 调压器采用接触式电动调压器, 调压范围为 0~430 V; 试验变压器为工频无局放高压试验变压器, 其额定电压为 150 kV/0.38 kV, 额定容量为 15 kW; 保护电阻的额定电压为 150 kV, 额定电流为 0.1 A, 标称阻值为 5 kΩ, 其作用是限制变压器负载短路电流, 以免因耦合电容器短路或放电模型击穿而烧坏变压器, 并可改善负载短路时产生的过电压和变压器绕组上的电位分布, 避免损坏变压器; 电容分压器的额定电压为 150 kV, 额定电容为 300 pF; 试验高压开关柜的电压等级为 10 kV.

试验采用具有 UHF 检测技术连接通道的局部放电检测仪. 通过 UHF 传感器对试验开关柜局部放电时产生的超高频电磁波信号进行检测, 从而获得局部放电的相关信息.

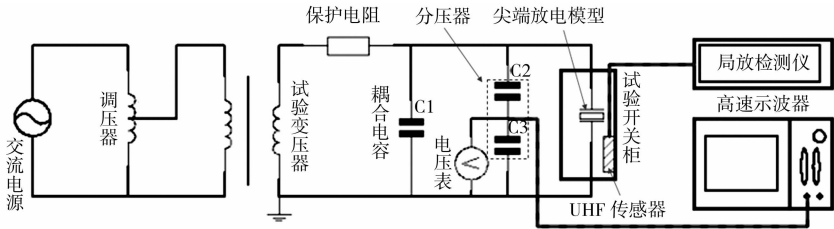


图 12 高压开关柜局部放电模拟试验平台接线图

Fig. 12 Wiring diagram of the partial discharge simulation test platform for high voltage switchgear

3.3 电晕起始电压测量

试验加压通过工频高电压试验手动控制台实现, 具有性能稳定、工作可靠、测量精确、操作方便等优点. 从 0 V 开始加压, 步长为 0.5~1.0 kV 可调, 加载工频电压, 直至发生电晕为止. 改变施加电压, 进行 8 组试验, 测得内部气隙电晕起始电压 U_s , 如表 3 所示.

表 3 电晕起始电压测量值
Tab. 3 Corona initial voltage measurement

试验序号	1	2	3	4	5	6	7	8
U_s/kV	3.7	4.6	4.2	4.8	5.3	6.1	5.0	4.2

由表 3 可知: 实验结果与仿真结果相近, 电晕起始电压的仿真结果为 4.4 kV, 而实验结果平均值为 4.7 kV. 由于实验条件的限制, 仅仅选择测量电晕起始电压进行实验验证, 然而, 实验结果与仿真结果高度相近, 大大提高了仿真分析结果的可信程度, 证明了有限元分析模型及研制的模型实物的正确性.

此外, 发生内部气隙放电时, 局部放电检测仪采集的放电点分布, 如图 13 所示. 由图 13 可知: 放电相位分布基本对称, 主要集中在 $0^\circ\sim90^\circ$ 及 $180^\circ\sim270^\circ$ 上, 基本符合 DL/T 417—2006《电力设备局部放电现场测量导则》所指定的内部气隙放电标准图谱, 这也间接验证了有限元分析模型及研制的模型实物的正确性.

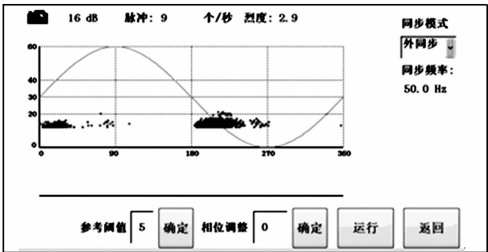


图 13 内部气隙放电点分布

Fig. 13 Discharge point distribution of air-gap model

4 结论

- 1) 根据高压开关柜的内部气隙放电机理, 设计出内部气隙放电有限元分析模型. 在电场分析的基础上, 研制出准确、实用的内部气隙放电实物模型.
- 2) 在气压为 0.4 MPa 的 SF_6 环境下, 对内部气隙放电有限元分析模型进行电场分析, 得到该模型的电晕起始电压和电晕层厚度, 并分析其随施加电压变化的规律及气隙模型参数.
- 3) 分析模型的非内部气隙处电场可知, 加压过程中, 模型的内部气隙放电产生伴生现象, 为确保检测结果可靠, 需将试验电压控制在 11 kV 以下, 保证局部放电检测技术有效性及验证结论的准确性.

参考文献:

- [1] 叶海峰,钱勇,王红斌,等.开关柜表面暂态地电压信号频谱特征[J].高电压技术,2015,41(11):3849-3857. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.2015.11.045.
- [2] 陈攀,姚陈果,廖瑞金,等.分频段能量谱及马氏聚类算法在开关柜局部放电模式识别中的应用[J].高电压技术,2015,41(10):3332-3341. DOI:10.13336/j.1003-6520.hve.2015.10.020.
- [3] 周沙,景亮.基于矩特征与概率神经网络的局部放电模式识别[J].电力系统保护与控制,2016,44(3):98-102. DOI: 10.7667/PSPC150708.
- [4] 陈金祥.基于介质窗口和UHF传感器的变压器局部放电检测与定位方法[J].电网技术,2014,38(6):1676-1680. DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2014.06.040.
- [5] 汪可,廖瑞金,王季宇,等.局部放电UHF脉冲的时频特征提取与聚类分析[J].电工技术学报,2015,30(2):211-219. DOI:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.2015.02.028.
- [6] 李军浩,韩旭涛,刘泽辉,等.电气设备局部放电检测技术述评[J].高电压技术,2015,41(8):2583-2601. DOI:10.13336/j.1003-6520.hve.2015.08.011.
- [7] DING Yujian, LU Fangchen, ZHANG Ze, *et al.* Discharge simulation of typical air gap considering dynamic boundary and charge accumulation[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2016, 44(11):2615-2621. DOI: 10.1109/TPS.2016.2600179.
- [8] XIE Bo, CHEN Weigen, ZHOU Qu, *et al.* Partition of the development stage of air-gap discharge in oil-paper insulation based on wavelet packet energy entropy[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(2):866-872. DOI:10.1109/TDEI.2015.005430.
- [9] ZHU Zhengguo, HUANG Chao, YU Ying, *et al.* Research on partial discharge mechanism and characteristics for 10 kV cable joint with air gap defect[C]//2014 China International Conference on Electricity Distribution (CICED). Shenzhen: [s. n.], 2014:1246-1250. DOI:10.1109/CICED.2014.6991906.
- [10] 覃宇.高压开关柜局放特性的研究[D].广州:华南理工大学,2015.
- [11] 陈希.开关柜内部绝缘缺陷的检测与研究[D].武汉:华中科技大学,2012.
- [12] 王琪,李秋香,王晓健,等.开关柜放电原因分析与治理[J].山东电力技术,2014,41(3):40-43. DOI:10.3969/j.issn.1007-9904.2014.03.010.
- [13] 王峰.252 kV GIS 五种绝缘故障诱发因素的模拟计算及试验研究[D].济南:山东大学,2015.
- [14] 赵信华.变电站一次设备高电压放电原因分析及预防研究[D].济南:山东大学,2015.
- [15] 叶培霖.基于地电波原理的开关柜局部放电检测与定位系统研究[D].广州:华南理工大学,2014.
- [16] 陈曦,陶霁韬,潘成,等.固体绝缘材料内部气隙局部放电物理模型概述[J].绝缘材料,2015,12(2):6-11. DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2015.12.002.
- [17] 乔胜亚,周文俊,唐念,等.不同吸附剂对GIS局部放电特征气体变化规律的影响[J].电工技术学报,2016,31(3):113-120. DOI:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.2016.03.015.
- [18] 陈伟根,杜杰,凌云,等.变压器油纸绝缘气隙放电能量-小波矩特征及放电过程划分[J].电力自动化设备,2014,34(6):89-95. DOI:10.3969/j.issn.1006-6047.2014.06.016.
- [19] 严璋,朱德恒.高电压绝缘技术[M].北京:中国电力出版社,2007.

(责任编辑:钱筠 英文审校:吴逢铁)