

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201906029



高压开关柜尖端放电的电场计算与分析

彭长青¹, 许超², 尚荣艳¹, 方瑞明¹

(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, 福建 厦门 361000)

摘要: 针对高压开关柜的尖端放电, 首先, 提出仿真分析局部放电问题时阈值判据的计算方法, 并推导出电晕层厚度的计算公式; 然后, 考虑到湿度是影响高压开关柜局部放电的重要因素, 通过实验数据拟合, 得到电晕起始电压随相对湿度的变化公式; 最后, 采用有限元分析软件进行尖端放电的电场计算与分析, 并通过尖端放电实验测试电晕起始电压. 仿真实验结果表明: 高压开关柜尖端放电的电场计算方法是正确的, 且简便实用, 有助于高压开关柜进行结构优化设计.

关键词: 尖端放电; 高压开关柜; 湿度; 电晕起始电压; 电晕层厚度

中图分类号: TM 591 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2020)02-0244-06

Electric Field Calculation and Analysis of Tip Discharge in High Voltage Switchgear

PENG Changqing¹, XU Chao²,
SHANG Rongyan¹, FANG Ruiming¹

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

Abstract: In this paper, the tip discharge in high-voltage switchgear was taken as the research object. Firstly, the calculation method of the threshold criterion for simulating the partial discharge problem was proposed and the calculation formula of the corona layer thickness was derived. Secondly, considering that the humidity is an important factor affecting the partial discharge in high voltage switchgear, the varying formula of the corona onset voltage with relative humidity was obtained by analyzing the experimental data. Finally, the finite element analysis software was used to calculate and analyze the electric field of tip discharge in high voltage switchgear, and the corona onset voltage was tested by the tip discharge experiment. The simulation experiment results show that the calculation method of the electric field at the tip discharge of the high voltage switchgear is correct, simple and practical, and it is helpful for the structural optimization design of the high voltage switchgear.

Keywords: tip discharge; high voltage switchgear; humidity; corona onset voltage; corona layer thickness

高压开关柜广泛应用于电力系统, 其运行安全直接影响到供电质量和供电可靠性^[1-2]. 开关柜内部空间紧凑, 结构较为复杂, 绝缘距离小, 容易产生局部放电. 据统计, 2014 年北京市配电网开关柜发生局部放电 8 次, 占开关柜缺陷总数的 15%^[3]. 局部放电是影响高压开关柜正常运行的重要因素, 将局部放

收稿日期: 2019-06-24

通信作者: 彭长青(1976-), 男, 实验师, 主要从事电气装置状态监测与故障诊断的研究. E-mail: mymail@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51707068); 福建省厦门市科技计划项目(3502Z20153029)

电控制在合理的水平是高压开关柜设计的关键问题. 开关柜局部放电的产生与其电场的分布密切相关. 近年来, 随着电磁场分析软件的发展^[4-10], 二维乃至三维空间的电场分析的困难大大降低. 周雪会等^[11]研究金属尖端电晕放电时, 根据试验数据施加仿真模型的激励源. 20 世纪 20 年代, Peek^[12] 在大量电晕实验数据的基础上, 总结出计算起晕场强的经验公式, 即 Peek 公式. 此后几十年, 研究者提出了一些电晕起始判据, 如 Ortéga 公式、Lowke 公式、流注起始场强公式、流注起始临界电荷判据, 以及气体自持放电的光电离模型等^[13]. 若将这些经验公式与仿真分析结合, 研究结果必然更加准确.

湿度也是影响高压开关柜局部放电程度的重要因素^[14]. 中国南方空气湿度高, 以福建省厦门市为例, 晴天的空气湿度一般都会超过 50%, 雨天更是达到 99%. 除此之外, 电缆沟道内聚集的污水、高压室的渗水和漏雨等, 都可以产生水气进入开关柜内, 增加开关柜的空气湿度, 甚至在开关柜内部形成凝露. 国内外已经展开了湿度对电晕的影响规律研究^[15-18], 只是机理比较复杂. 很多情况下, 并不具备研究局部放电的实验条件, 因而有必要建立简便实用的湿度影响放电的经验公式.

为此, 本文以高压开关柜的尖端放电为研究对象, 提出仿真分析局部放电问题时阈值判据的计算方法, 推导出电晕层厚度的计算公式.

1 尖端放电的电场计算

1.1 高压开关柜的尖端放电

高压开关柜容易发生尖端放电有如下 6 个主要部位^[19-24]. 1) 裸露在空气中的电缆分接头的铜排. 因为空气潮湿而产生铜锈, 导致铜排表面粗糙不平, 形成很多凸起部位. 2) 由于制造工艺、生产水平及其他原因, 开柜内母线和元器件不能避免地存在棱角、毛刺. 3) 某些连接件处的螺丝出牙长度过长. 4) 开关柜内掉落的金属异物. 5) 因碰撞造成的金属凸起. 6) 镀银层剥落的金属尖端.

开关柜内尖端处的电荷聚集, 导致电场畸变. 相对于其他部位, 电场强度更大. 当尖端部位的电场强度达到临界场强时, 空气将发生局部电离, 进而发生尖端放电.

1.2 尖端放电的阈值判据

尖端放电具有极不均匀电场特征, 属于“针-板”电晕电场. 当“针-板”两电极间的电位差(V) 逐渐增大时, 最初发生非自持放电; 而当 V 增大到一定数值后, 电晕就发生了. 该电压就是电晕放电的阈值, 称为起晕电压或电晕起始电压或电晕放电阈值电压^[25]. 设针顶端的曲率半径为 r , 间隙距离为 d , 电晕层厚度为 y , 尖端部位电场示意图, 如图 1 所示.

针电极附近外电场值最大, 远离针电极区域空间电场逐渐减小^[26]. 沿着间隙轴心离针顶端 x 距离处的电场强度^[25] 为

$$E_x = 2V / \{ (r + 2x) \ln[(r + 2d)/r] \}. \quad (1)$$

根据 Peek 公式, “针-板”正极性电晕起始场强^[27-28] 为

$$E_c = E_0 (1 + 0.043 6 / \sqrt{r\delta}). \quad (2)$$

式(2)中: E_0 为理想空气的击穿强度, $E_0 = 3.0 \times 10^6 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$; δ 为相对空气密度, $\delta = 2.92c/\alpha$, 其中, c 为气压(Pa), α 为绝对温度(K), 文中 δ 值取 1. 若在 $x=0$ 处的场强 $E_x = E_c$, 则此时两电极间的电位差即为电晕起始电压 V_c . 联立式(1)与式(2), 可得

$$V_c = E_c \cdot \frac{r}{2} \cdot \ln[(r + 2d)/r]. \quad (3)$$

1.3 电晕层厚度计算

针顶端区域局部电场很高, 发生电离, 这个区域称为电晕层, 电晕层的边界就是临界电场 E_y (理想空气为 E_0). 在这个区域以外, 电场弱, 不发生或很少发生电离^[25]. 根据式(1), 可以确定电晕层厚度 y 计算式为

$$y = \frac{1}{2} \left(\frac{2V}{E_y \ln[(r + 2d)/r]} - r \right). \quad (4)$$

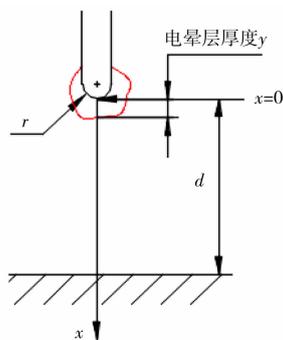


图 1 尖端部位电场示意图
Fig. 1 Schematic of electric field near tip

开关柜的内部结构复杂,在设计开关柜时,计算某些尖端部位的电晕起始电压和电晕层厚度,有助于定性分析发生放电的可能性和放电强度,进而改进开关柜的结构.

1.4 湿度对尖端放电的影响

随着相对湿度 H 的增加,附着系数 η 的增加率高于电离系数 α ,空气间隙中电离减少,电晕起始电压增加.然而,当 H 超过一定值以后,空气间隙中电离增多,电晕起始电压下降^[29].简而言之,电晕起始电压随着湿度的增加呈现先上升后下降,规则比较复杂.就高压开关柜而言,研究湿度高的影响即可.研究表明,湿度小时,电晕起始电压变化量很小,可忽略不计;当湿度足够大($H \geq 50\%$)时,电晕起始电压线性下降^[30].根据文献[30]的实验数据进行线性拟合,得到电晕起始电压随着湿度的变化关系为

$$V'_c = V_{50\%} [1 - 0.976(H - 50\%)]. \tag{5}$$

式(5)中: $V'_c, V_{50\%}$ 分别为考虑湿度和相对湿度为 50%时电晕起始电压.

2 尖端放电的电场有限元分析

2.1 有限元分析模型

借鉴《国家电网公司电力设备带电检测仪器年度定期性能检测方案》规定的电晕典型缺陷放电模型,采用 Ansoft Maxwell 三维电磁场有限元分析软件,搭建尖端放电 3D 模型,如图 2 所示.激励源和边界条件:1) 求解域设置为空气;2) 接地电极电位值设置为 0 V;3) 尖端为高压电极,设置高电位;4) 尖端曲率半径 $r = 1 \text{ mm}$,针板间隙距离 $d = 4 \text{ mm}$.

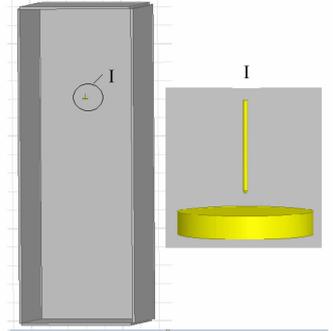


图 2 尖端放电有限元分析模型
Fig. 2 Finite element analysis model of tip discharge

2.2 不同湿度下的电晕起始电压

Allen 等^[31]的研究表明,湿度的增加会使得流注的起始场强 E 增大,其影响程度 ϵ 为

$$\epsilon = \frac{E - E_0}{E_0} \frac{1}{\rho - \rho_0}. \tag{6}$$

式(6)中:每当环境绝对湿度 ρ 改变 $1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, E 相应变化 $\epsilon, \rho_0 = 11 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$.

不同的放电类型, ϵ 的取值也不同,通常不高于 5%. 取 $\epsilon = 4\%$ 进行仿真,得到不同湿度下的电晕起始电压,如表 1 所示. 表 1 中: V_{si}, V_{th} 分别为电晕起始电压的仿真值和理论值. 表 1 中的理论值是根据式(5)计算所得;绝对湿度 ρ 换算为相对湿度 H ,取值与实验时相同,以方便后文分析比较.

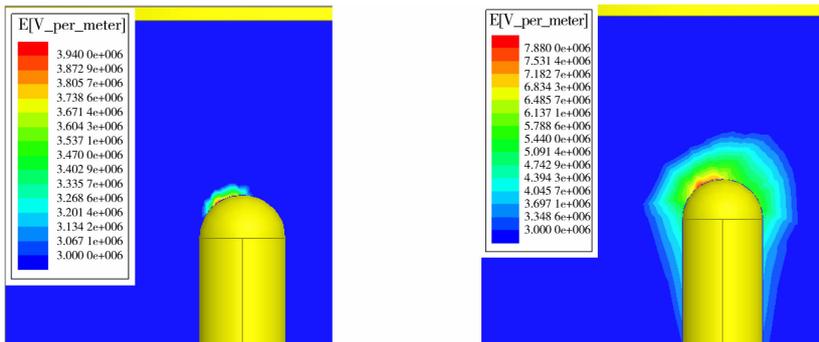
表 1 不同湿度下的电晕起始电压

Tab. 1 Corona onset voltage at different humidity

$H/\%$	54.4	76.3	79.8	83.3	85.3	88.0	90.6
V_{si}/kV	3.55	2.81	2.69	2.57	2.50	2.41	2.31
V_{th}/kV	3.59	2.78	2.66	2.53	2.46	2.36	2.26

2.3 电晕层厚度仿真计算

改变高压电极施加电压,可以得到不同电压(V)时尖端的场强分布情况,如图 3 所示. 不同电压下



(a) $V = 5 \text{ kV}$

(b) $V = 10 \text{ kV}$

图 3 尖端部位的场强分布

Fig. 3 Field intensity distribution near tip

的电晕层厚度(y),如表2所示.表2中: y_{si} 、 y_{th} 分别为电晕层厚度的仿真值和理论值; e 为误差.

从图3和表2可知:电晕层边界的临界电场为理想空气的击穿强度 E_0 .因此,彩虹条下限为 $3.0 \times 10^6 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$,最外的线条就是电晕层的边界;随着电压的增加,电晕层越厚.

以10 kV为例,不同湿度下的电晕层厚度,如表3所示.表3中: y_{si} 、 y_{th} 分别为电晕层厚度的仿真值和理论值; e_r 为相对误差.

从表3可知,不改变高电位电压,电晕层厚度随着湿度的增加而增加.另外,表2、3中的相对误差部分偏大,这主要是因为理论计算公式(5)本是经验公式.理论与仿真计算电晕层厚度,尽管相对误差部分偏大,但是绝对误差小,最大不到0.25 mm,足以用来作为确定绝缘距离的参考.

表3 不同湿度下的电晕层厚度

Tab.3 Corona layer thickness at different humidity

$H/\%$	54.4	76.3	79.8	83.3	85.3	88.0	90.6
y_{si}/mm	1.167	1.442	1.535	1.585	1.610	1.683	1.773
y_{th}/mm	1.115	1.556	1.650	1.752	1.815	1.908	2.002
$e_r/\%$	4.7	-7.3	-7.0	-9.5	-11.3	-11.8	-11.4

3 实验验证

3.1 实验平台

依据国家行业标准 DL/T 417—2006《电力设备局部放电现场测量导则》提供的电力设备局部放电现场设备测量指导,搭建10 kV高压开关柜局部放电试验平台^[32],如图4所示.图4中:交流电源为380 V,三相,50 Hz;调压器的调压范围为0~430 V;试验变压器的额定容量为15 kV·A,额定电压为150 kV/0.38 kV;4)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 k Ω ;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.

与仿真实验一样,试验开关柜中的尖端放电模型借鉴《国家电网公司电力设备带电检测仪器年度定期性能检测方案》的电晕典型缺陷放电模型,其实物如图5所示.尖端放电区域用有机玻璃密封,针电极采用铜丝进行代替,针尖到板电极之间的距离可调.设置尖端放电模型的间隙为4 mm,针端曲率半径为1 mm;用喷雾器朝模型所在开关柜室喷雾,采用精创GSP温湿度记录仪记录湿度值;采用暂态地电压检测法(TEV)进行局部放电检测.

3.2 湿度对电晕起始电压的影响

改变开关柜室内的湿度,进行局部放电实验,测得不同湿度下的电晕起始电压,如表4所示.

表4 不同湿度下的电晕起始电压

Tab.4 Corona onset voltage at different humidity

$H/\%$	54.4	76.3	79.8	83.3	85.3	88.0	90.6
V_c/kV	3.4	3.0	2.9	2.7	2.7	2.5	2.3

发生尖端放电时,局部放电检测仪采集的放电点分布,如图6所示(取相对湿度79.8%所得的放电点分布).根据表1的理论值、仿真值和表4的实验值,电晕起始电压随相对湿度的变化,如图7所示.

表2 不同电压下的电晕层厚度
Tab.2 Corona layer thickness at different voltages

V/kV	y_{si}/mm	y_{th}/mm	$e/\%$
5	0.26	0.28	7.7
6	0.41	0.51	24.4
7	0.56	0.72	28.6
8	0.71	0.88	23.9
9	0.87	1.04	19.5
10	1.02	1.11	8.8

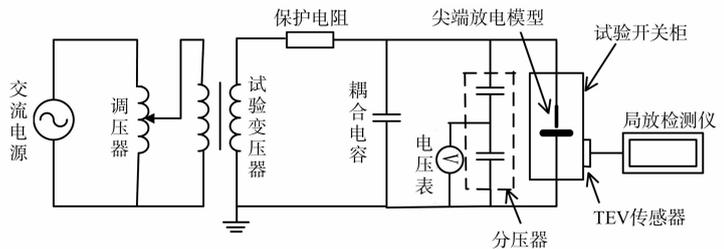
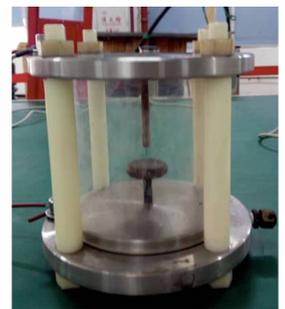


图4 10 kV高压开关柜局部放电试验平台接线图

Fig.4 Partial discharge test platform of 10 kV high-voltage switchgear

图5 尖端放电模型实物
Fig.5 Physical tip discharge model

计算得到电晕起始电压仿真值、实验值和理论值的相对误差,如表5所示.表5中: e_{si} , e_{exp} 分别为相对误差的仿真值和实验值.

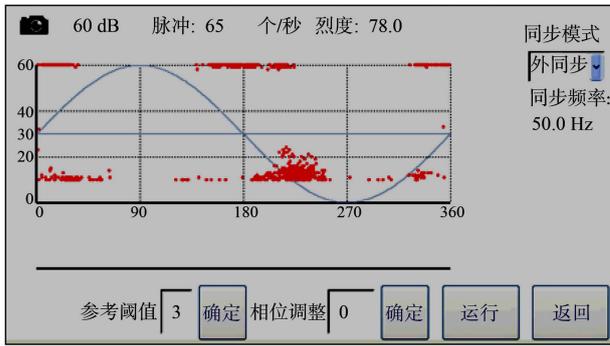


图6 尖端放电点分布

Fig. 6 Tip discharge point distribution

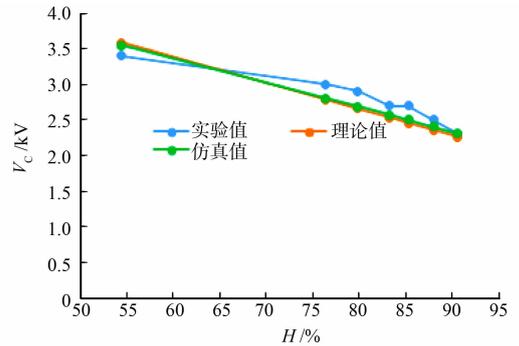


图7 电晕起始电压随相对湿度变化

Fig. 7 Corona onset voltages at different relative humidity

表5 电晕起始电压的相对误差

Tab. 5 Relative error of corona onset voltage

$H/\%$	54.4	76.3	79.8	83.3	85.3	88.0	90.6
$e_{exp}/\%$	-5.3	7.6	9.1	6.7	9.8	6.0	1.6
$e_{si}/\%$	-1.1	0.8	1.2	1.5	1.7	2.2	2.0

从图7与表5可知:不同的相对湿度下,无论是仿真,还是实验,电晕起始电压与理论值相近,式(6)可以反映湿度对开关柜尖端放电的电晕起始电压的影响;湿度对高压开关柜尖端放电的电晕起始电压影响很大,相对湿度越大,电晕起始电压越小.

4 结论

1) 以高压开关柜的尖端放电为研究对象,提出仿真分析局部放电问题时阈值判据的计算方法,并推导出电晕层厚度的计算公式.理论计算与仿真分析结合,研究局部放电必然更加准确.

2) 湿度是影响高压开关柜局部放电的重要因素,然而,湿度对电晕特性的影响规律复杂.通过分析实验数据,可以得到电晕起始电压随着相对湿度的变化公式.这个公式化繁为简,非常实用.

3) 计算电晕层厚度、电晕起始电压,并分析湿度对它们的影响,有助于判断是否有可能发生放电;同时,定性分析放电强度,确定绝缘距离,进而可以改进开关柜结构.这可避免某些地方间隙太小,或者某些地方过尖锐,从而导致放电.

4) 文中的计算分析方法可以供其他需考虑电晕问题的电气设备(如电机、变压器)参考.

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] 黄诗敏.10 kV 开关柜局部放电带电检测技术应用与仿真分析研究[D].北京:北京交通大学,2015.
- [4] 邵先军,何文林,刘石,等.电力设备局部放电特高频电磁波数值计算技术研究[J].西安交通大学学报,2016,50(12):24-31. DOI:10.7652/xjtubx201612005.
- [5] 舒胜文,陈金祥,陈彬,等.应用正向传输系数的GIS局部放电UHF传感器布置方式现场校核方法[J].电网技术,2016,40(9):2910-2915. DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2016.09.046.
- [6] ZHENG Shusheng, LI Chengrong, TANG Zhiguo, et al. Location of PDs inside transformer windings using UHF methods[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(1): 386-393. DOI:10.1109/TDEI.2014.6740763.

- [7] GUO Hongfu, LU Fusheng, REN Kuanfang. Simulation and measurement of PD-induced electromagnetic wave leakage in GIS with metal belt[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(4):1942-1949. DOI:10.1109/TDEI.2014.004390.
- [8] 贾勇勇, 杨景刚, 高山, 等. 高压开关柜内部电场仿真及其影响因素分析[J]. 高压电器, 2017, 53(6):154-160. DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.06.026.
- [9] 程显, 袁端磊, 潘明, 等. 40.5 kV 低 SF₆ 含量气体绝缘金属封闭开关柜样机研制[J]. 大连理工大学学报, 2015, 55(5):529-536. DOI:10.7511/dllgxb201505013.
- [10] 苏海博, 普美娜, 朱兆芳, 等. 基于 Ansys 仿真的开关柜局部放电研究[J]. 高压电器, 2017, 53(2):159-165. DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.02.025.
- [11] 周雪会, 陈登义, 陈则煌. 大气电场下金属尖端电晕放电阈值的研究[J]. 电瓷避雷器, 2016, 273(5):152-159. DOI:10.16188/j.isa.1003-8337.2016.05.029.
- [12] PEEK F W. Dielectric phenomena in high voltage engineering[M]. New York: McGraw-Hill, 1929.
- [13] 舒胜文, 刘畅, 阮江军. 棒-板电极正直流电晕起始判据对比[J]. 武汉大学学报(工学版), 2015, 48(6):836-841. DOI:10.14188/j.1671-8844.2015-06-018.
- [14] 冯波, 肖代波, 李毅, 等. 暂态对地电压和超声法用于开关柜不同湿度 PD 检测研究[J]. 高压电器, 2015, 51(4):67-71. DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.04.013.
- [15] 刘有为, 李继红, 李斌. 空气密度和湿度对导线电晕特性的影响[J]. 电网技术, 1990, 14(4):46-50.
- [16] 惠建峰, 关志成, 王黎明, 等. 正直流电晕特性随气压和湿度变化的研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(33):53-58. DOI:10.3321/j.issn:0258-8013.2007.33.010.
- [17] ROKUNOHE T, KATO T, KOJIMA H, *et al.* Calculation model for pre-dicting partial-discharge inception voltage in a non-uniform air gap while considering the effect of humidity[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(2):1123-1130. DOI:10.1109/TDEI.2017.005920.
- [18] WAKIMOTO T, KOJIMA H, HANAI M, *et al.* Transition of partial discharge inception voltage under high humidity for enameled rectangular wires[C]//2013 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Shenzhen: IEEE Press, 2013:1181-1184. DOI:10.1109/CEIDP.2013.6748317.
- [19] 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.
- [20] 覃宇. 高压开关柜局部放电特性的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 王峰. 252kV 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.
- [24] 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.
- [25] 徐学基. 气体放电物理[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1996.
- [26] 郑殿春, 夏云双, 赵大伟, 等. 非均匀场下 SF₆ 短间隙正电晕放电行为[J]. 电机与控制学报, 2013, 17(5):75-79. DOI:10.3969/j.issn.1007-449X.2013.05.01.
- [27] ORTÉGA P. Electrical behavior of large air intervals subjected to voltage waves of positive or negative polarity [D]. Pau: University of Pau, 1992.
- [28] RAKOTONANDRASANA J H, BEROUAL A, FOFANA I. Modelling of the negative discharge in long air gaps under impulse voltages[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2008, 41(10):105210. DOI:10.1088/0022-3727/41/10/105210.
- [29] ABDEL-SALAM M. Positive wire-to-plane coronas as influenced by atmospheric humidity[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2007, 21(1):35-40. DOI:10.1109/TIA.1985.349640.
- [30] FOUAD L, ELHAZEK S. Effect of humidity on positive corona discharge in a three electrode system[J]. Journal of Electrostatics, 1995, 35(1):21-30. DOI:10.1016/0304-3886(95)00009-y.
- [31] ALLEN N L, BOUTLENDJ M. Study of the electric fields required for streamer propagation in humid air[J]. IEEE Proceedings A Science, Measurement and Technology, 1991, 138(1):37-43. DOI:10.1049/ip-a-3.1991.0005.
- [32] 许超. 基于 UHF 的 10 kV 高压开关柜局部放电在线监测研究[D]. 厦门: 华侨大学, 2017.