

110 kV 悬式绝缘子串绝缘清洗剂带电清洗泄漏 电流安全性评价

李辰盟¹, 苏师敏², 万志强¹, 钟 岚², 朱文超¹, 樊亚东²

(1. 广东电网公司江门供电局, 江门 529000; 2. 武汉大学电气工程学院, 武汉 430072)

摘 要: 绝缘清洗剂带电清洗输电线路污秽绝缘子是目前带电清洗的一种方式。为了研究绝缘清洗剂带电清洗的安全性, 开展了 110 kV 悬式绝缘子串绝缘清洗剂带电清洗泄漏电流特性试验, 对 LXHY4-70 玻璃绝缘子串和 XP-160 瓷绝缘子串进行绝缘清洗剂带电清洗, 清洗过程对绝缘子串泄漏电流在线实时监测。试验发现清洗过程中泄漏电流呈逐渐增大的趋势, 清洗到绝缘子最顶部的时候达到最大值, 然后有少许的降低, 清洗前后泄漏电流变化不大。LXHY4-70 玻璃绝缘子串在 b、c、d、e 这 4 种污秽等级下, 泄漏电流基波幅值最大值分别为 0.30、0.26、0.27、0.33 mA, 起始阶段泄漏电流均 < 0.3 mA。XP-160 瓷绝缘子串在 b、c、d、e 这 4 种污秽等级, 泄漏电流基波幅值最大值分别为 0.33、0.23、0.40、0.27 mA, 起始阶段泄漏电流均 < 0.2 mA。清洗过程中各污秽等级的泄漏电流最大值均没有超过《电力设备带电水冲洗规程》中规定值, 绝缘清洗剂带电清洗作业符合安全作业标准。论文通过试验验证了 110 kV 悬式绝缘子串绝缘清洗剂带电清洗泄漏电流安全性, 对实际工程有重要指导意义。

关键词: 绝缘清洗剂; 绝缘子串; 带电清洗; 泄漏电流; 污秽等级

0 引言

输变电设备外绝缘污闪事故会对电力系统造成严重危害, 进而严重影响电力系统的安全可靠运行^[1]。目前国内外电力系统采用的带电清污方式主要有带电机械清扫、带电水冲洗、带电化学剂清洗^[2-4]。

带电清扫易造成二次污染。带电水冲洗技术具有清洗效果好、作业效率高、设备简单且运行维护方便等优点^[5-8], 在电力系统应用广泛。然而, 带电水清洗的限制条件较多^[9], 清扫前盐密值大于临界盐密规定值、环境潮湿、避雷器及密封不良的设备等情况下不宜进行带电水清洗。

使用绝缘清洗剂清洗输电线路绝缘子在山区、缺水地区是一种重要的补充带电清洗手段。绝缘清洗剂绝缘性高, 击穿电压高^[10-11], 清洗过程中不会因为污秽被清洗剂湿润导致绝缘强度下降。由于绝缘清洗剂表面张力低^[12], 在与污秽接触后, 会在污秽层迅速铺展^[13], 在对污秽溶解渗透的作用过程中降低污秽附着力, 在此基础上施加适当的压力液注作用使污秽脱落^[14]。绝缘清洗剂清洗电力设备防污闪绝缘维护技术在大型发电机组、大型电动机、视频监控系

统、污染严重的煤电装置去污中取得了成效, 也已多次成功应用于 220 kV 以下变电站, 防污

闪效果突出^[15]。黄松波等研究了 500 kV 绝缘子两种带电水冲洗方法, 发现 4 种污秽等级、一冲四回方法和一冲六回方法泄漏电流基波幅值最大值均小于 6 mA^[16]。国内外还没有开展绝缘清洗剂带电清洗泄漏电流特性的研究, 清洗过程中不同污秽等级的玻璃绝缘子串和瓷绝缘子串的泄漏电流特性及泄漏电流特征值缺乏数据支撑。

为此, 本文开展了 110 kV 悬式绝缘子串绝缘清洗剂带电清洗泄漏电流安全性评价研究。对不同污秽等级 LXHY4-70 玻璃绝缘子串和 XP-160 瓷绝缘子串进行绝缘清洗剂带电清洗, 清洗过程对绝缘子串泄漏电流实时在线监测并对清洗过程中泄漏电流特性进行分析。

1 试品

针对 110 kV 输电线路玻璃绝缘子与瓷绝缘子开展试验, 每串绝缘子串有 7 片绝缘子。试验所用绝缘子为 LXHY4-70 玻璃绝缘子和 XP-160 瓷绝缘子, 绝缘子结构见图 1, 绝缘子参数如表 1 所示。

试验所涉及的污秽度分为 b、c、d、e 这 4 种等级, 在配污过程中, 用氯化钠模拟自然污秽中的导电介质, 用高岭土模拟污秽中的不溶物, 用胶水增加污秽的黏着力。模拟现场污秽各个等级所采用的

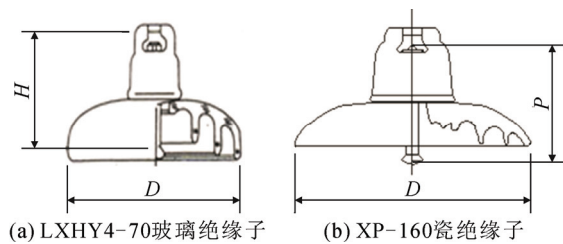


图1 110 kV 常用型号绝缘子结构图

表1 110 kV 绝缘子各参数

型号	材料	上表面积/cm ²	下表面积/cm ²	总表面积/cm ²	爬距/mm	盘径/mm	结构高度/mm
LXHY4-70	玻璃	870	1378	2248	400	255	146
XP-160	瓷	681	891	1572	305	255	155

污秽成分及量值如表2所示^[7]。涂污时, 可以将绝缘子拆卸, 单片涂污, 这样对于下表面的涂污会较为均匀。全部涂污完成后将绝缘子悬挂, 等待污秽干燥后就可以开始进行清洗试验。

对试验所用绝缘清洗剂进行气相色谱—质谱成分分析。试验所用绝缘清洗剂基本成分及相对含量如表3所示, 对绝缘清洗剂中占比较高的成分进行物理化学性质分析, 结果如表4所示。

从测试结果可以看出, 该绝缘清洗剂主要成分有6种, 分别是二氯甲烷(15.69%)、丁醇(0.93%)、四氯乙烯(65.35%)、壬烷(2.71%)、癸烷(9.96%)和十一烷(2.38%)。

2 试验方法

电力设备在运行中, 绝缘强度长期受电场、温度和机械振动的作用会逐渐发生劣化, 包括整体劣化和部分劣化, 形成绝缘缺陷。工频交流耐压试验就是对电力设备施加一定的电压, 并保持一定时间, 以考察电力设备绝缘承受各种电压的能力。工频交流耐压试验的电压、波形、频率和在电力设备绝缘内部电压的分布均符合实际运行情况, 能有效地发现电气设备存在的绝缘缺陷, 是考验电力设备绝缘承受各种过电压能力最严格、最有效的方法, 是保证设备安全运行的重要手段。

清洗前为了保证试验安全, 需对延长杆段和环氧绝缘作业杆段工具进行工频耐压试验, 在规定的工频耐受试验电压和耐受时间下, 无闪络、无击穿、无发热即为合格。根据现有的标准 GB/T 16927.1—2011《高电压试验技术第一部分: 一般定义及试验

表2 模拟现场污秽所采用的污秽成分的量值

污秽等级	污秽成分密度/(mg·cm ⁻²)		
	氯化钠	高岭土	胶水
b	0.04	0.2	
c	0.08	0.4	0.5
d	0.2	1.0	
e	0.4	2.0	

表3 绝缘清洗剂的基本成分及相对含量

编号	保留时间/min	化合物	分子式	分子量	相对含量
1	1.719	二氯甲烷	CH ₂ Cl ₂	99	15.69%
2	2.396	1-丁醇	C ₄ H ₁₀ O	74	0.93%
3	4.299	四氯乙烯	C ₂ Cl ₄	165	65.35%
4	5.497	壬烷	C ₉ H ₂₀	128	2.71%
5	6.630	癸烷	C ₁₀ H ₂₂	142	9.96%
6	7.573	十一烷	C ₁₁ H ₂₄	156	2.38%

表4 绝缘清洗剂基本成分的物理性质

名称	密度/(g·mL ⁻¹)	熔点/°C	沸点/°C	闪点/°C	毒性
二氯甲烷	1.325	-97	39.8	无	有毒
1-丁醇	0.8109	-88.9	117.5	35	有毒
四氯乙烯	1.622	-22.2	121.2	无	有毒
壬烷	0.72	-51	150.8	31	有毒
癸烷	0.73	-29.7	174.1	46	有毒
十一烷	0.74	-26	196	60	有毒

要求》、DL/T 976—2005《带电作业工具、装置和设备预防性试验规程》、DL/T 878—2004《带电作业用绝缘工具试验导则》规定, 试验电压为580 kV, 耐压时间为3 min, 有效绝缘长度为3.7 m。清洗工具合格后开始进行配污、涂污及清洗试验。

悬式单串绝缘子一般布置如图2所示, 清洗方式为从高压侧往低压侧运动, 即由下端开始清洗, 清洗至顶端后反向进行清洗。上升清洗过程应适当放缓, 下降清洗过程可以适当加快速度清洗。清洗泵压控制在5 Mpa, 清洗距离控制在20~30 cm内, 喷嘴直径为1 mm。由于该距离下的清洗液柱截面直径仅在10 cm左右, 所以清洗时应当注意来回扭动喷嘴。同时, 注意观察绝缘子串表面放电情况, 若发现有不正常放电现象, 应该立即停止清洗, 单串绝缘子串清洗时间至少为168 s。

衡量带电清洗的安全性指标主要为泄漏电流。泄漏电流是指在作用电压下, 绝缘子受潮时所测得流过表面污层后到达地的电流。它是气候、电压和污秽等综合作用以及最终反映的结果, 被认为是能科学的反映绝缘子表面污秽度的一个动态参数。清

洗过程对绝缘子串泄漏电流实时在线监控并遵守严格的安全制度,通过对泄漏电流的监测研究 110 kV 悬式绝缘子串绝缘清洗剂带电清洗的安全性。泄漏电流数据由泄漏电流传感器传输给泄漏电流测量系统,收集的实验数据由数据采集主机接收,再由数据采集主机通过网线将测量数据实时传输并储存到计算机中,通过软件界面即可监控各绝缘子串的泄漏电流实时波形。

图 3 是对绝缘子串泄漏电流在线监控原理图。采集到的泄漏电流特征值包括泄漏电流起始与结束时刻幅值,泄漏电流最大值与总冲洗时长。通过比较泄漏电流各个特征值与《电力设备带电水冲洗规程》规定最大值,确定绝缘清洗剂清洗是否安全。

3 绝缘清洗剂带电清洗泄漏电流特性

通过对悬式单串绝缘子进行绝缘清洗剂带电清洗及泄漏电流监测,得到绝缘清洗剂带电清洗泄漏电流特性。图 4 是 110 kV 电压等级 LXHY4-70 绝缘子串各污秽等级下带电清洗泄漏电流基波幅值比较,图 5 是 110 kV 电压等级 XP-160 绝缘子串各污秽等级下带电清洗泄漏电流基波幅值比较。

对于 LXHY4-70 玻璃绝缘子串, c、d 污秽等级的绝缘子串在清洗过程中的泄漏电流较小, b 污秽等级的绝缘子串的泄漏电流略大, e 污秽等级的绝缘子串的清洗中的泄漏电流最大。对于 XP-160 绝缘子串, c 污秽等级的绝缘子串的泄漏电流最小, d 污秽等级的绝缘子串的泄漏电流最大。对比玻璃绝缘子和瓷绝缘子在清洗结束后的泄漏电流的变化,得出瓷绝缘子的泄漏电流在清洗结束后的 5 s 时间内有着较为明显的下降,而玻璃绝缘子的泄漏电流下降的较为平滑,并不是很明显。

LXHY4-70 绝缘子串各污秽等级下带电清洗泄漏电流特征值如表 5 所示。从表 5 中可以看出,4 个污秽度等级下,起始时刻泄漏电流幅值均低于结束时刻泄漏电流幅值,而结束时刻泄漏电流幅值与整个冲洗过程中泄漏电流最大幅值相差不大。带电清洗过程中泄漏电流呈逐渐增大的趋势,然后有少许降低。绝缘清洗剂清洗绝缘子前后泄漏电流变化并不大。各个污秽等级泄漏电流幅值均不超过 0.4 mA,没有超过《电力设备带电水冲洗规程》规定值,绝缘清洗剂带电清洗符合安全作业标准。

LXHY4-70 绝缘子串在 b、c、d、e 这 4 种污秽度等级下,泄漏电流基波幅值最大值分别为 0.30 mA、

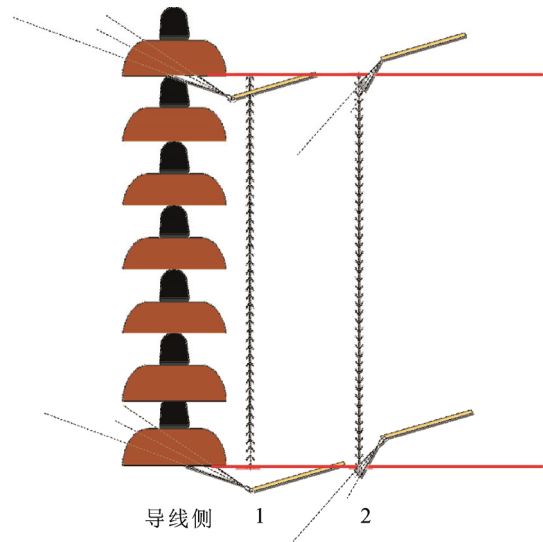


图 2 悬式单串绝缘子布置和清洗示意图

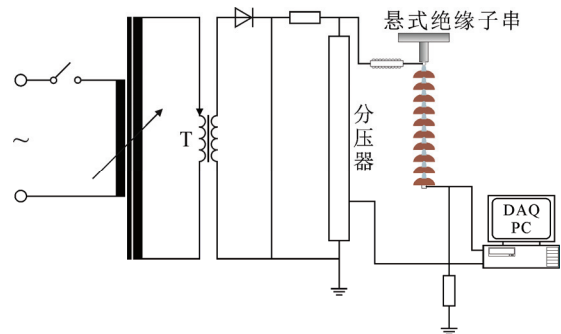


图 3 绝缘子串泄漏电流实时在线监控原理图

0.26 mA、0.27 mA、0.33 mA,起始阶段泄漏电流均 $< 0.3 \text{ mA}$ 。与带电水冲洗相比,绝缘清洗剂带电冲洗在整个冲洗过程中泄漏电流更小,且绝缘清洗剂电阻率远远高于带电水冲洗用水的电阻率,安全性更高。

XP<160 绝缘子串各污秽等级下带电清洗泄漏电流特征值如表 6 所示。从表 6 中可以看出,与 LXHY4<70 玻璃绝缘子类似,4 种污秽度等级下,起始时刻泄漏电流幅值均低于结束时刻泄漏电流幅值,而结束时刻泄漏电流幅值与整个冲洗过程中泄漏电流最大幅值相差不大。在带电清洗过程中,泄漏电流呈逐渐增大趋势,然后有少许降低。绝缘清洗剂清洗绝缘子前后的泄漏电流变化并不大。各个污秽等级泄漏电流幅值均 $\leq 0.4 \text{ mA}$,因此绝缘清洗剂带电清洗作业安全。

XP<160 绝缘子串在 b、c、d、e 这 4 种污秽度等级,泄漏电流基波幅值最大值分别为 0.33 mA、0.23 mA、0.40 mA、0.27 mA,起始阶段泄漏电流均 $< 0.2 \text{ mA}$ 。

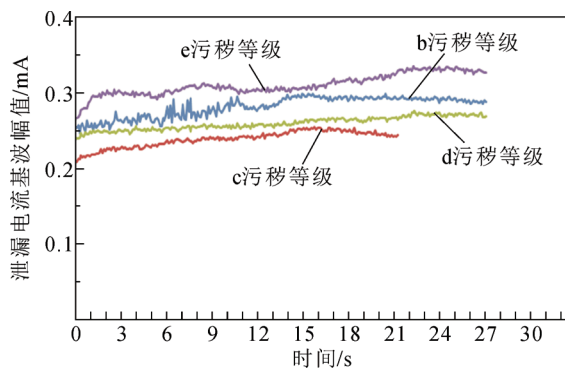


图4 LXHY4-70 绝缘子串泄漏电流基波幅值比较

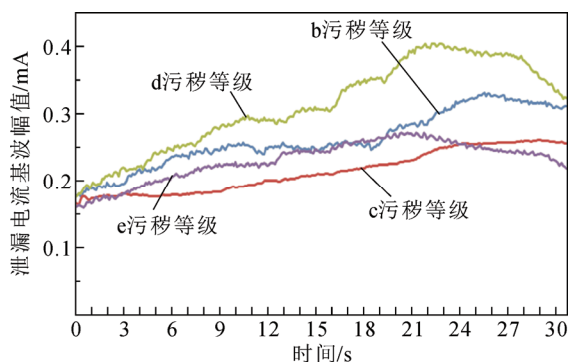


图5 XP-160 绝缘子串泄漏电流基波幅值比较

表5 LXHY4-70 绝缘子串各污秽等级下泄漏电流特征值

污秽等级	起始时刻幅值 /mA	结束时刻幅值 /mA	最大值 /mA	总冲洗时长 /s
b	0.254 4	0.295 1	0.299 0	15.6
c	0.209 6	0.254 0	0.256 2	15.7
d	0.240 5	0.269 1	0.272 4	21.9
e	0.267 9	0.323 8	0.326 7	20.9

表6 XP-160 绝缘子串各污秽等级下泄漏电流特征值

污秽等级	起始时刻幅值 /mA	结束时刻幅值 /mA	最大值 /mA	总冲洗时长 /s
b	0.176 4	0.325 7	0.330 6	26
c	0.165 5	0.229 7	0.230 0	21
d	0.175 1	0.397 9	0.403 0	22
e	0.159 7	0.266 9	0.271 3	21

4 结论

1) 110 kV 悬式绝缘子串绝缘清洗剂带电清洗过程中在较长区间段泄漏电流幅值较小, 呈逐渐增大的趋势, 清洗到绝缘子最顶部的时候达到其最大值, 然后有少许的降低。清洗前后泄漏电流变化不大, 基波成分是泄漏电流主要成分。

2) 对于 LXHY4-70 玻璃绝缘子而言, b、c、d、e 这 4 种污秽等级, 泄漏电流基波幅值最大值分别为 0.30、0.26、0.27、0.33 mA, 起始阶段泄漏电

流均<0.3mA。对于 XP-160 瓷绝缘子, b、c、d、e 这 4 种污秽等级, 泄漏电流基波幅值最大值为 0.33、0.23、0.40、0.27 mA, 起始阶段泄漏电流均<0.2mA。绝缘子材质不同对清洗过程中泄漏电流值影响不大。

3) 清洗过程中, LXHY4-70 玻璃绝缘子与 XP-160 瓷绝缘子各污秽等级的泄漏电流基波幅值最大值均没有超过《电力设备带电水冲洗规程》规定值, 绝缘清洗剂带电清洗作业符合安全作业的标准。

参考文献

- [1] 刘 琴, 霍 锋, 周 魁, 等. ± 110 kV 输电线路 Y 型绝缘子串间隙放电特性及污闪特性分析[J]. 高电压技术, 2017, 43(10): 3182-3188.
- [2] GOTO S, NAKAMURA M, WATANABE T, et al. Automatic decision making of timing of insulator washing in coastal substations by pollution prediction through event matching model[C]//IEEE 1996 Report of the Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. [S.l.]: IEEE, 1996: 412-415.
- [3] 胡 毅, 刘 凯, 彭 勇, 等. 带电作业关键技术研究进展与趋势[J]. 高电压技术, 2014, 40(7): 1921-1931.
- [4] VITELLI M, TUCCI V, PETRARCA C. Temperature distribution along an outdoor insulator subjected to different pollution levels[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2000, 7(3): 416-423.
- [5] 魏增福. 带电清洗技术在广东电网的应用[J]. 清洗世界, 2010, 26(10): 13-16.
- [6] 王如璋. 带电水冲洗的现状与发展[J]. 东北电力技术, 1994(7): 41-43.
- [7] 樊亚东, 胡 聪, 王建国, 等. 500 kV 防污型与普通型支柱绝缘子带电清洗效率对比[J]. 高电压技术, 2017, 43(5): 1500-1508.
- [8] 蔡 力, 樊亚东, 王建国, 等. 500 kV 支柱绝缘子带电水冲洗清洗效率试验研究[J]. 高电压技术, 2017, 43(7): 2294-2300.
- [9] 电力设备带电水冲洗导则: GB/T 13395—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [10] 蒋 琨. 电力设备的带电化学清洗[J]. 高电压技术, 2001, 27(3): 53-54.
- [11] 余存焯. 工业清洗剂的选用及除污机理[J]. 清洗世界, 2008(1): 28-34.
- [12] 汤振鹏, 樊亚东, 王建国, 等. 带电清洗剂对绝缘子工频闪络电压的影响[J]. 高压电器, 2017, 53(8): 181-186.
- [13] 刘 凯, 朱天容, 刘 庭, 等. 绝缘子污秽成分分析与清洗剂去污机理研究[J]. 高电压技术, 2012, 38(4): 892-898.
- [14] 荣小平. 带电清洗剂的关键性能及开发思路[J]. 洗净技术, 2004(10): 34-37.
- [15] 易 雷. 带电化学清洗在电力设备绝缘维护中的应用[J]. 湖南电力, 2008, 28(4): 32-33.
- [16] 黄松波, 王祖林, 樊亚东, 等. 500 kV 输电线路绝缘子串带电水冲洗[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(27): 4724-4730.
- [17] 电力系统污区分级与外绝缘选择标准: QGDW152[S], 2006.

李辰盟

1988—, 男, 工程师
研究方向电气设备状态监测
苏师敏(通信作者)
1995—, 女, 硕士生
研究方向高压技术
E-mail: 2658837556@qq.com

收稿日期 2018-07-05 编辑 何秋萍