

基于标准化作业流程的配网设备带电清洗技术改进

宓士强

(国网西藏那曲供电公司, 西藏 那曲 852000)

摘要: 配网设备长期运行于户外环境, 绝缘表面易积聚污秽, 显著降低污闪电压, 威胁电网安全。传统停电清洗方式影响供电可靠性, 而现有带电清洗技术存在作业流程不规范、清洗剂性能不足、绝缘监测手段缺失等隐患, 易引发设备闪络或人员触电。文章系统分析带电清洗技术原理及现存问题, 提出基于标准化作业流程的改进方案, 通过建立三级绝缘监测体系、优化清洗剂配方、规范机械臂操作程序, 实现安全高效的带电清洗。应用表明, 该技术使清洗后绝缘子表面盐密值降至 0.03 mg/cm^2 以下, 憎水性恢复率达98%, 单次作业时间缩短40%, 有效提升配网设备运行可靠性。

关键词: 配网设备; 带电清洗; 标准化流程; 绝缘监测

中图分类号: TM64

DOI: 10.13882/j.cnki.ncdqh.2508A033

CSTR: 32400.14.ncdqh.2508A033

Improvement of Live Cleaning Technology for Distribution Network Equipment Based on Standardized Operating Procedures

MI Shiqiang

(State Grid Naqu Power Supply Company, Tibet Autonomous Region Naqu 852000, China)

Abstract: Distribution network equipment operates in outdoor environments for long periods, where insulating surfaces are prone to contamination, significantly reducing flashover voltage and threatening grid security. Traditional power-off cleaning methods compromise supply reliability, while existing live cleaning technologies suffer from issues such as non-standardized operating procedures, limited cleaning agent performance, and insufficient insulation monitoring, which may lead to equipment flashover or electric shock accidents. This paper systematically analyzes the principles of live cleaning and its potential risks, and proposes an improved approach based on standardized operating procedures. The method establishes a three-level insulation monitoring system, optimizes cleaning agent formulations, and standardizes robotic arm operations to ensure safe and efficient live cleaning. Application results show that the proposed technology reduces the equivalent salt deposit density (ESDD) on insulator surfaces to below 0.03 mg/cm^2 , achieves a hydrophobicity recovery rate of 98%, and shortens single-operation time by 40%, thereby significantly enhancing the operational reliability of distribution network equipment.

Keywords: distribution network equipment; live cleaning; standardized operating procedures; insulation monitoring

随着城市化进程加速, 配电网设备规模持续扩大, 绝缘子污闪事故已成为威胁配网安全的主要因素之一。据统计, 污闪事故在配网故障总数中的占比较高, 传统停电清洗模式导致年均停电时长增加48 h^[1]。带电清洗技术因其无需停电的优势逐步推广, 但实际应用中暴露3大问题: 1) 流程缺失, 作业依赖人员经验, 清洗路径、喷淋压力等参数无统一标准^[2]; 2) 监测盲区, 缺乏实时绝缘状态评估, 无法识别清洗过程中的局部放电风险^[3]; 3) 材料缺陷, 商用清洗剂残留导电物质, 干燥后反而加剧污秽积聚^[4]。本文以10 kV架空线路绝缘子为对象, 构建

收稿日期: 2025-08-12

“监测-清洗-验证”标准化作业体系, 解决带电清洗技术应用瓶颈。

1 技术原理与现有隐患分析

1.1 带电清洗技术机理

带电清洗技术的基本原理在于利用特定绝缘介质通过专用设备进行定向喷淋, 从而有效剥离并清除附着在带电运行设备表面的污秽层^[5]。其核心作用机理包含3个相互关联的方面。严格控制的清洗剂电导率是确保作业安全的基础, 通常要求其值低于 $500 \text{ }\mu\text{S/m}$, 以防止在喷淋过程中形成意外的电流导通通道。在喷淋作业时, 特定压力下形成的雾化

水流能够构建有效的纵向绝缘屏障，该屏障对于抑制设备表面泄漏电流的增大具有关键作用。清洗完成后，设备表面的残留液膜必须在较短时间内实现完全动态干燥，这一过程通常应控制在 3 min 以内，其目的是防止湿润的表面快速吸附环境中的污秽物质，造成污秽复吸现象。

1.2 现有技术隐患分析

1.2.1 流程失范引发闪络

非标准化操作导致 2 大风险见图 1。

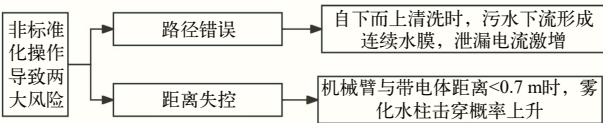


图1 非标准化操作导致两大风险

在带电清洗的实际操作中，流程的失范是引发设备闪络事故的首要原因。非标准化的操作行为主要带来 2 种典型风险。当清洗路径选择错误，例如采用自下而上的方式进行喷淋时，清洗产生的污水会沿绝缘子伞裙向下流淌，极易形成连续的导电水膜，导致泄漏电流急剧增大，实测值可超过安全阈值 5 mA，达到 15 mA 的危险水平。同时，若作业过程中机械臂与带电体之间的距离控制不当，例如小于 0.7 m 时，雾化水柱因电场畸变而发生击穿的概率会显著上升。

1.2.2 材料性能缺陷

市售清洗剂的材料性能缺陷是影响长期清洗效果的深层次问题，见表 1。其主要性能指标与标准要求存在明显差距。在残留物含量方面，标准要求不高于 0.01%，但实际市售产品的典型缺陷值范围在 0.05%~0.12% 之间。表面张力指标标准要求不高于 25 mN/m，而缺陷值则高达 30~35 mN/m。干燥时

间标准要求在 180 s 以内，但缺陷值往往长达 240~300 s。这些缺陷的综合作用，特别是高残留物在瓷绝缘子表面形成的导电性盐垢，直接导致设备污闪电压下降，严重削弱了设备的绝缘强度。

表1 市售清洗剂主要问题

指标	标准要求	典型缺陷值
残留物含量/%	≤0.01	0.05~0.12
表面张力/(mN·m ⁻¹)	≤25	30~35
干燥时间/s	≤180	240~300

1.2.3 绝缘监测失效

现有技术对绝缘状态的监测能力严重不足，主要依赖操作人员的目视检查，无法实现绝缘状态的量化精确评估。在清洗过程中，当局部放电量超过 50 pC 时，存在诱发闪络的显著风险。对于复合绝缘子，若清洗后其憎水性未能有效恢复（例如从 HC 级劣化至 HC6 级），其耐受污秽环境下的电压能力将大幅降低。

2 改进措施

2.1 构建三级绝缘监测体系

为确保带电清洗作业的安全可控，建立了覆盖作业前、作业中、作业后全流程的三级绝缘监测体系，见图 2。第一级作业前评估是基础环节，采用紫外成像技术对目标设备进行扫描，精准检测并定位存在电晕放电的污秽严重区段。同时，必须严格测量并评估作业环境条件，当环境湿度超过 80% 或风速达到四级以上时，必须禁止或延后清洗作业。第二级动态过程监控是保障作业安全的核心，在清洗设备上安装高精度泄漏电流传感器，设定明确的

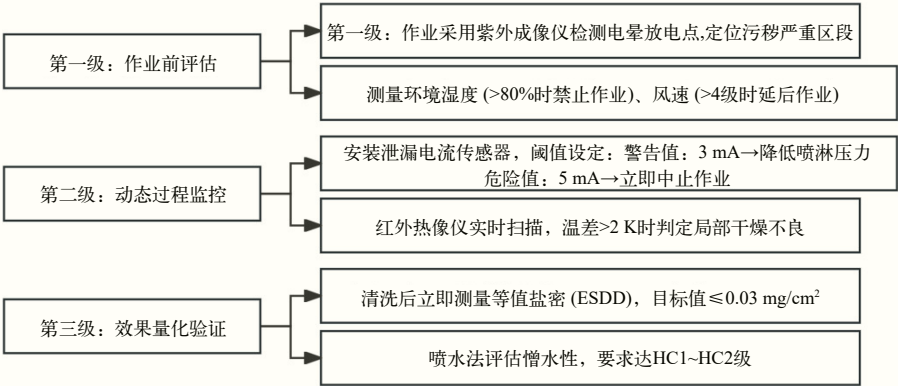


图2 三级绝缘监测体系

分级响应阈值。当泄漏电流达到 3 mA 的警告值时，系统自动提示降低喷淋压力；当电流突破 5 mA 的危险值时，则必须立即中止作业进程。辅以红外热像仪对清洗表面进行实时扫描，若发现局部区域温差超过 2 K，则判定该区域存在干燥不良风险。第三级效果量化验证是确保清洗质量的最终关卡，在作业结束后立即测量绝缘子表面的等值盐密值，严格确保其达到目标值。同时，采用标准喷水法评估绝缘子的憎水性恢复等级，要求必须恢复至 HC1~HC2 级。

2.2 清洗剂及装备优化

针对清洗剂的核心性能短板，对其配方进行了针对性的科学优化，见表 2。关键组分的优化显著提升了清洗剂的综合性能。表面活性剂由传统的烷基苯磺酸钠替换为氟碳聚合物，使得清洗剂的表面张力有效降低至 22 mN/m。助溶剂由乙二醇单丁醚改进为改性硅氧烷，显著缩短了清洗后的干燥时间至 120 s 以内。特别添加了纳米二氧化硅作为防残留剂，确保清洗后残留量稳定控制在 0.008% 以下。在作业装备方面，对清洗机械臂进行了功能升级，加装了高精度激光测距模块，确保在动态作业过程中机械臂与带电体之间的距离始终保持在 0.8~1.2 m 的安全区间内。预设了科学合理的“螺旋上升”清洗路径，并严格控制清洗喷口与绝缘子轴线之间的夹角恒定为 45°，以实现较好的污秽剥离效果。

表2 配方改进

组分	传统配方	优化配方	功能提升
表面活性剂	烷基苯磺酸钠	氟碳聚合物	表面张力降至 22 mN/m
助溶剂	乙二醇单丁醚	改性硅氧烷	干燥时间缩短至 120 s
防残留剂	无	纳米二氧化硅	残留量≤ 0.008%

2.3 标准化作业流程

基于上述技术改进，制定了详尽且可操作性强的五步标准化作业流程，见图 3。第一步状态评估要求必须使用紫外成像设备对目标区域进行扫描，并结合盐密预测测试数据综合判断设备污秽状况；第二步参数设定严格规定了关键工艺参数的范围，喷淋压力应精确设定在 (0.5±0.05) MPa 之间，机械臂移动速度应稳定控制在 0.3 m/s；第三步分级清洗

细分为 3 个递进阶段，首先使用纯水进行第一遍冲洗，主要去除设备表面积聚的浮尘，其次使用优化配方的专用清洗剂进行第二遍重点清洗，旨在彻底清除顽固油污，最后使用高纯度去离子水进行第三遍漂洗，最大程度减少导电性残留物；第四步实时调控要求操作人员必须基于泄漏电流传感器和红外热像仪的实时监测数据，动态调整喷淋压力、移动速度等关键工艺参数；第五步效果闭环强调清洗完成后必须立即进行盐密测试和憎水性评估双重验证，任何一项指标未达标均需执行返工作业，确保清洗效果完全符合安全运行要求。

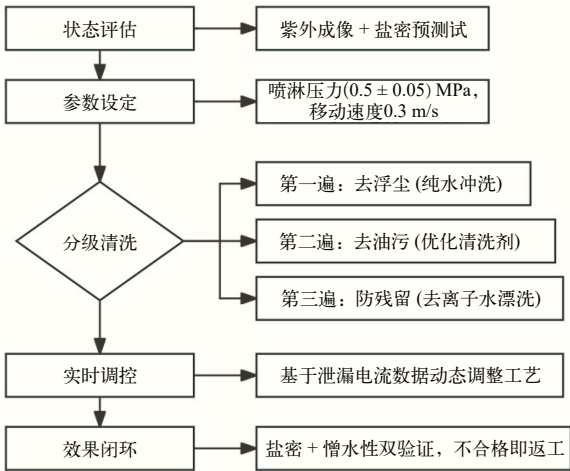


图3 五步操作法

3 效果检查

3.1 实验室验证

在模拟实际工况的人工污秽实验室内，对传统带电清洗方法与优化后的技术方案进行了严谨的性能对比测试，见表 3。在污闪电压提升方面，传统方法下的平均污闪电压为 28.3 kV，而优化方案则显著提升至 36.7 kV，提升幅度达到 29.7%。在局部放电抑制方面，传统方法清洗后的局部放电量平均为 42 pC，优化方案将其有效抑制至 8 pC，降幅高达 81%。在憎水性恢复能力方面，传统方法的恢复率

表3 传统与改进方案对比

项目	传统方法	优化方案	提升幅度/%
污闪电压/kV	28.3	36.7	+29.7
局部放电量/pC	42	8	-81
憎水性恢复率/%	72	98	+26

仅为 72%，优化方案则实现了 98% 的高恢复率。

3.2 现场应用数据

于 2024 年在西藏配电网 30 条线路上规模化实施优化后的带电清洗技术体系，取得了显著的综合效益。在作业效率方面，平均单次清洗作业时间从原来的 85 min 大幅缩减至 51 min。在设备可靠性提升方面，经过清洗的线路在后续 6 个月的运行监测期内，污闪故障发生次数为零。而在同期未实施清洗的对比线路上，则发生了 7 次污闪故障。在经济性方面，该技术的应用有效减少了因设备故障和计划停电导致的电量损失，估算每年可减少停电带来的经济损失约 240 万元。

3.3 典型操作验证

标准化流程执行记录见表 4。

表4 标准化流程执行记录（10 kV 线路绝缘子清洗）

步骤	操作内容	监测数据	判定标准	结果
1	紫外成像扫描	电晕点 3 处	≤5 处合格	通过
2	第一遍纯水冲洗	泄漏电流 1.2 mA	<3 mA	通过
3	优化清洗剂去污	温差 0.8 K	<2 K	通过
4	去离子水漂洗	残留电导率 300 μS/m	<500 μS/m	通过
5	清洗后盐密测试	0.021 mg/cm ²	≤0.03 mg/cm ²	通过

4 结束语

本研究针对配电网带电清洗技术在实际应用中暴露的流程失范、监测缺失、材料缺陷等核心隐患，成功构建了一套以全过程三级绝缘监测为核心技术支撑、以高性能优化清洗剂为关键材料基础、以标准化作业流程为根本实施保障的综合技术体系。通过严格的实验室测试与大规模的现场工程应用验证，充分证明该改进方案能够使设备污闪电压提升 29.7%，憎水性恢复率达到 98%，作业效率提高 40%。所制定的标准化作业流程有效解决了以往清洗路径随意性大、绝缘状态监测缺失等根本性问题，为配电网设备的状态维护工作提供了坚实可靠的技术支撑。未来研究将致力于将该技术体系扩展应用于更高电压等级如 35 kV 变电站设备的带电清洗，并积极探索开发智能诊断模块，以期最终实现清洗工艺参数的智能化自适应调整，进一步提升技术的安全性及效率。

参考文献

- [1] 邱泽坚,邵伟涛,黄琳妮.基于人工智能的 10 kV 配网智能感知与故障诊断[J].农村电气化,2023(3):63-65.
- [2] 祝永刚,吕超.基于需求侧响应的光伏直流微网智慧管控平台设计[J].农村电气化,2021(12):5-9.
- [3] 王明涛,罗崇文,罗平,等.铁路隧道接触网绝缘子污闪的动态检测系统研究[J].科技资讯,2025(7):61-63.
- [4] 吴田,刘鑫源.复合绝缘子清洗剂浸润污层沿面放电特性研究[J].湖南电力,2024,44(3):75-82.
- [5] 袁文胜.可见光通信设备带电清洗技术应用研究[J].光源与照明,2023(10):91-93.

作者简介

宓士强（1980—），男，大学本科，高级工程师，研究方向为供用电技术，E-mail: 12004114@qq.com。

（责任编辑：刘艳玲）

资讯

陕西完成首个 5G 智能分布式故障自愈测试

2025 年 9 月 10 日，陕西省首个基于 5G 通信的智能分布式馈线自动化（FA）示范项目，在国网陕西铜川供电公司完成现场测试。馈线自动化测试系统显示“案例执行完成，实测结果合格”，标志着该公司配电自动化应用在故障处置效率上成功实现从“秒级隔离”向“秒内自愈”的突破，为配电网高质量发展实现新突破提供支撑。

示范项目以铜川市核心区域“华原东线—华正线”联络线路为场景，应用 5G 技术探索提升信息安全水平及供电可靠性。通过在调度端建设 SPN 设备接入移动 5G 传输网，以硬切片方式打通终端到主站数据通道，构建无线、高速、安全的通信链路；在网络层部署下沉 UPF 设备、AR 路由器实现端到端数据直连，为终端间建立高速的本地信息通道；改进 5G 配电终端的功能要求、性能指标、控制逻辑、维护手段及管理规范。该公司突破传统级差保护、重合识别故障的传统模式，100 ms 内精准切除和隔离故障，1 s 内实现转供负荷，系统故障处置速度大幅提升。

此次测试为基于 5G 的配电自动化智能分布式 FA 系统方案设计、运行方式、实用化运维、管理规范等方面积累了宝贵经验，为后续系统性推广配电网故障自愈功能打下了基础。

信息来源：《中国电力报》