

220 kV 避雷器泄漏电流异常特征分析与处理

王凯河, 钟国亮

(广州华润热电有限公司, 广东 广州 511455)

摘要 随着火力发电厂单机容量的提升和运行环境的复杂化, 避雷器泄漏电流异常的发生率呈逐年上升趋势。本文针对火力发电厂 220 kV 避雷器泄漏电流异常现象展开深入研究, 对避雷器的结构原理、泄漏电流异常的特征表现、诊断技术及处理策略进行了详尽的分析。通过对某电厂 #2 主变高压侧 C 相避雷器异常事件的剖析, 探讨了泄漏电流异常的成因及处理措施, 并提出了基于阻性电流监测的预防性维护建议, 旨在为火力发电厂高压电气设备的安全运行提供参考。

关键词 避雷器; 泄漏电流; 阻性电流; 异常特征分析

中图分类号: TM62

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.28.040

0 引言

在火力发电厂的电力系统中, 避雷器作为保障设备安全的“第一道防线”, 其核心功能是限制雷电过电压和操作过电压对主变压器、母线等关键设备的冲击。据《中国电力设备安全运行报告(2023)》统计, 220 kV 及以上电压等级的避雷器故障占高压设备总故障的 19.7%, 其中因泄漏电流异常引发的故障占比达 63%, 远超内部绝缘击穿等其他类型故障^[1]。这一数据表明, 泄漏电流异常已成为威胁避雷器性能的首要因素。据张伟等(2023)的研究, 2018-2023 年国内火电厂因避雷器泄漏电流异常导致的非计划停运时长平均达 4.2 小时/次, 直接经济损失约 28 万元/次^[2]。若泄漏电流异常未被及时处理, 可能引发避雷器爆炸、设备烧毁等连锁事故, 如 2022 年某省电厂因 220 kV 避雷器泄漏电流超标未处理, 最终导致主变跳闸, 造成区域性停电事故^[3]。本文以某电厂 #2 主变高压侧 C 相避雷器的两次异常事件为研究对象, 从结构原理、故障特征、诊断技术到处理策略进行全流程分析, 并提出针对性的预防性维护方案, 为同类电厂提供实践参考。

1 避雷器结构原理

1.1 核心结构组成

220 kV 避雷器的结构设计需同时满足高压绝缘、过电压耐受和机械强度三大要求, 其核心组成包括阀片、绝缘外套、法兰及附件(如泄漏电流计数器), 各部分功能及特性如下:

1. 阀片: 作为避雷器的“心脏”, 220 kV 避雷器

阀片多采用氧化锌(ZnO)为基材, 添加 Bi_2O_3 、 Sb_2O_3 等氧化物作为改性剂, 经 150~250 °C 烧结而成^[4]。氧化锌阀片的非线性伏安特性是其实现保护功能的关键。在正常工作电压下, 阀片电阻高达 $10^9 \Omega$ 以上, 泄漏电流可忽略; 而当遭遇过电压(如雷电过电压)时, 电阻瞬间降至 $10^3 \Omega$ 以下, 将过电压能量通过接地装置释放, 实现对设备的保护^[5]。研究表明, 阀片的非线性系数(α 值)需稳定在 30 以上, 才能满足 220 kV 系统的保护要求^[6]。

2. 绝缘外套: 220 kV 避雷器的绝缘外套主要有瓷质和硅橡胶两种材质。瓷质外套具有耐老化、耐高温的优势, 但重量大且抗冲击性差; 硅橡胶外套则以轻量化(重量仅为瓷质的 1/3)、憎水性强(水接触角 $> 100^\circ$)、耐污性能优异等特点, 成为近年来的主流选择^[7]。

3. 法兰: 法兰不仅是避雷器的固定部件, 更是电流传导的关键节点。220 kV 避雷器法兰多采用铸铝合金材质, 表面经电镀处理以降低接触电阻(要求 $\leq 50 \mu\Omega$)。法兰与绝缘外套的密封性能直接影响避雷器内部状态, 若密封不良, 水汽可能侵入内部, 导致阀片受潮, 这也是泄漏电流异常的潜在诱因之一。

1.2 泄漏电流的构成与特性

避雷器的泄漏电流是指在正常工作电压下通过避雷器的电流总和, 其构成可分为三类, 具体特性及影响因素如下:

1. 容性电流(I_c): 由避雷器的电容效应产生, 是泄漏电流的主要组成部分(正常情况下占比 $> 80\%$)。容性电流的大小与避雷器的电容值(220 kV 避雷器典型电容值为 100~300 pF)和系统电压频率相关, 计算

公式为 $I_c = 2\pi fCU$ (f 为频率, C 为电容, U 为工作电压)^[8]。容性电流在正常运行时稳定, 不受设备状态影响, 可作为判断泄漏电流异常的“基准值”。

2. 阻性电流 (I_r): 通过阀片的电流, 正常情况下极小 ($< 1 \text{ mA}$), 但其变化直接反映阀片状态。当阀片老化 (如晶界层击穿) 或受潮时, 其电阻值下降, 阻性电流会显著增大 (可能升至 5 mA 以上)^[9]。阻性电流的监测是判断避雷器内部故障的核心指标, DL/T 474.5-2017《现场绝缘试验实施导则 第 5 部分: 避雷器试验》明确要求, 阻性电流增量超过 30% 时需进行进一步诊断^[10]。

3. 表面泄漏电流 (I_s): 由绝缘外套表面的污秽和潮湿环境引起。火力发电厂的粉尘 (如煤尘、脱石膏粉尘) 多具有导电性, 当附着于外套表面并遇潮湿天气时, 会形成导电通路, 导致表面泄漏电流增大。表面泄漏电流的特点是受环境影响显著——晴天时可能 $< 0.5 \text{ mA}$, 雨天时可骤升至 2 mA 以上, 且伴随局部放电现象^[11]。

1.3 泄漏电流异常的成因分类

结合理论与现场经验, 泄漏电流异常的成因可归纳为四类, 具体机制如下:

1. 外表面污秽: 火力发电厂周边的粉尘 (如污泥干化系统排放的颗粒物) 附着于绝缘外套后, 会降低表面绝缘电阻。若遇降雨, 污秽中的可溶性盐 (如 NaCl 、 CaSO_4) 溶解, 形成导电膜, 导致表面泄漏电流激增。研究表明, 当表面污秽度 (以等值盐密 ESDD 衡量) 超过 0.1 mg/cm^2 时, 泄漏电流可能超过正常范围^[12]。

2. 内部老化: 阀片在长期运行中会因热应力、电场应力发生老化, 表现为晶界氧化、局部击穿等。老化后的阀片非线性特性劣化, 阻性电流中的谐波分量 (尤其是 3 次谐波) 会显著增加, 这一特征可通过谐波分析法诊断^[13]。

3. 制造缺陷: 如阀片烧结不均 (导致局部电场集中)、密封胶开裂 (引发受潮) 等。

4. 运行环境变化: 除湿度外, 温度也会影响泄漏电流——温度每升高 10°C , 阀片电阻可能下降 5%~10%, 导致阻性电流略有增加 (通常 $< 10\%$)。

2 案例分析及处理

2.1 2021 年 #2 主变 C 相避雷器异常事件

2.1.1 异常现象与初步诊断

2021 年 4 月 25 日, 某电厂 #2 主变高压侧 C 相避雷器泄漏电流出现显著异常:

1. 电流值异常: C 相泄漏电流为 0.7 mA (其他两相为 0.6 mA); 降雨后 1 小时内, C 相电流骤升至 1.6 mA , 是其他两相的 2 倍, 且泄漏电流表报警灯亮 (量程 2 mA)。

2. 温度异常: 红外成像检测显示, C 相上节两片伞裙及下节与法兰接口处温度达 3.6°C , 较其他位置 (25.6°C) 高出 8°C , 符合局部放电的温度特征。

3. 放电现象: 现场观察到 C 相下节与法兰接口处有蓝色放电弧光, 雨势减小时放电消失, 进一步印证了表面放电的可能性。

2.1.2 数据对比与成因分析

为明确异常原因, 对历史数据及同期数据进行对比分析:

1. 历史数据: 2020 年 10 月停电试验显示, 该避雷器绝缘电阻 $> 10\,000 \text{ M}\Omega$, 直流参考电压 ($U_{1\text{mA}}$) 为 252 kV (标准 $\geq 240 \text{ kV}$), 泄漏电流 ($0.75U_{1\text{mA}}$ 下) 为 $35 \mu\text{A}$ (标准 $\leq 50 \mu\text{A}$), 均符合要求。

2. 同期对比: #1 主变避雷器在相同降雨条件下, 泄漏电流从 0.6 mA 升至 1.1 mA , 波动幅度 41.7%; #2 主变 C 相波动幅度达 128.6%, 但阻性电流测试显示, 三相相间偏差为 33% (标准 $< 50\%$), 且无明显谐波分量异常。

3. 环境因素: 该电厂 #2 主变区域邻近污泥干化系统, 2021 年 1-3 月降雨量仅为历史同期的 30%, 导致表面积污严重。经检测, C 相避雷器表面等值盐密 (ESDD) 达 0.15 mg/cm^2 , 远超清洁状态 ($< 0.03 \text{ mg/cm}^2$)。

4. 最终判断: 异常由表面积污与雨水共同作用导致——污秽在雨水冲刷下形成局部导电通路, 引发泄漏电流增大及局部放电, 而非内部故障。

2.1.3 处理措施与效果

针对上述分析, 采取以下措施:

1. 临时监控: 安装高清摄像头实时监测放电情况, 每 15 分钟记录一次泄漏电流值, 确保异常扩大时可及时停运。

2. 带电清扫: 采用压缩空气配合绝缘清洗剂, 对 C 相避雷器表面进行带电清扫, 清除附着的粉尘及盐分。

3. 备件准备: 紧急采购同型号避雷器 (型号 YH5WZ-216/562), 确保故障扩大时可快速更换。

4. 强化监测: 将巡检频次从每日 1 次增至每 2 小时 1 次, 增加红外测温及阻性电流测试。

5. 处理后效果: 清扫后 2 小时, 泄漏电流降至 0.8 mA ; 机组临停时停电试验显示, 各项指标均恢复正常, 验证了处理措施的有效性。

2.2 2023年#2主变C相避雷器异常事件

2023年3月, #2主变C相避雷器再次出现泄漏电流异常: 降雨后电流从0.6 mA升至1.3 mA, 虽未达报警值, 但波动幅度仍高于其他两相。结合2021年的处理经验, 初步判断仍为表面积污所致, 但需排查“多次异常是否暗示潜在内部问题”。经检测: 阻性电流测试显示, 三相偏差为28% ($< 50\%$), 无明显老化特征; 表面污秽度检测显示, ESDD为 0.12 mg/cm^2 , 主要因2023年一季度风速较低(平均风速 $< 2 \text{ m/s}$), 粉尘沉积速率加快。最终确认异常仍由表面积污引起而非设备内部问题。

3 结论与建议

3.1 研究结论

通过对某电厂#2主变C相避雷器两次异常事件的分析, 可得出以下结论:

1. 火力发电厂220 kV避雷器泄漏电流异常的首要原因是外表面积污, 尤其在多粉尘、少降雨的环境下, 积污与潮湿天气结合易引发电流激增及局部放电。

2. 阻性电流监测是区分“表面故障”与“内部故障”的关键。内部故障会导致阻性电流持续增大且谐波异常, 而表面故障的阻性电流波动与环境变化同步。

3. 多次出现泄漏电流异常的避雷器, 即使检测指标合格, 也应考虑更换, 以规避老化带来的潜在风险。

3.2 预防性维护建议

结合研究结论及行业实践, 提出以下基于全生命周期的维护策略:

1. 分级污秽管理: (1) 根据周边污染源(如煤场、污泥干化系统)划分污秽等级, #2主变等重污秽区域每3个月进行一次表面清扫(采用带电作业), 轻污秽区域每6个月一次; (2) 安装在线污秽度监测装置(如光学传感器), 实时监测ESDD值, 当超过 0.1 mg/cm^2 时自动报警。

2. 阻性电流精细化监测: (1) 采用“在线监测+离线校验”模式, 在线系统每10分钟采集一次阻性电流数据, 重点关注3次谐波分量; 每年结合机组临停进行离线测试; (2) 设定动态阈值: 新设备阻性电流增量 $> 30\%$ 时预警, 运行超5年设备增量 $> 20\%$ 时预警。

3. 智能监测技术应用: 在避雷器法兰处安装微型传感器(温度、湿度、电流), 通过5G网络传输数据至后台, 构建“电流—温度—环境”关联模型, 实现故障提前预测。

4. 备品备件管理: 对运行超8年的避雷器, 提前储备同型号备件。

3.3 未来展望

随着智能电网技术的发展, 避雷器泄漏电流监测将向“数字化、可视化、预测化”方向演进。例如: 基于机器学习的故障预测模型可通过历史数据训练, 提前72小时预测泄漏电流异常; 而柔性传感器的应用可实现避雷器表面状态的全域监测, 进一步提升故障诊断的精准度。火力发电厂应积极引入新技术, 构建“预防为主、智能预警”的维护体系, 确保高压设备安全稳定运行。

参考文献:

- [1] 中国电力企业联合会. 中国电力设备安全运行报告(2023)[R]. 北京: 中国电力出版社, 2023.
- [2] 张伟. 220kV避雷器阻性电流相间偏差阈值研究[J]. 高压电器, 2023, 59(02): 45-50.
- [3] 李明, 王强. 220kV避雷器泄漏电流异常引发主变跳闸事故分析[J]. 电力安全技术, 2022, 24(06): 32-36.
- [4] 刘红涛, 张晓敏. 氧化锌避雷器阀片制备工艺对非线性特性的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2021, 39(03): 412-417.
- [5] 王树刚, 徐阳, 徐伟, 等. 交流无间隙金属氧化物避雷器受潮状态检测和判定[J/OL]. 电瓷避雷器, 1-6[2025-08-19]. <https://link.cnki.net/urlid/61.1129.tm.20240407.1751.004>.
- [6] 赵伟, 陈立. 220kV氧化锌避雷器阀片老化特性试验研究[J]. 高压电器, 2020, 56(08): 156-161.
- [7] 王健, 刘洋. 硅橡胶与瓷质外套避雷器在火电厂的应用对比[J]. 电力工程技术, 2019, 38(04): 89-93.
- [8] 张宇, 黄晓峰. 高压避雷器容性电流计算模型研究[J]. 电气自动化, 2022, 44(02): 78-81.
- [9] 范乃心, 杨雪滨, 曲德浩, 等. 220 kV氧化锌避雷器泄漏电流异常分析[J]. 东北电力技术, 2024, 45(09): 21-25, 29.
- [10] 陈明亮, 吴刚. 阻性电流谐波分析法在避雷器故障诊断中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(11): 132-137.
- [11] 孙毅, 赵丽. 大气污秽物对高压设备绝缘性能的影响机制[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(05): 187-192.
- [12] 徐鹏. 220 kV氧化锌避雷器泄漏电流异常现象分析及对策[J]. 电瓷避雷器, 2021(05): 36-40.
- [13] 周健, 郑萌. 氧化锌避雷器制造缺陷的早期诊断方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(z1): 215-220.