

电力工程施工中的接地技术及故障排查探讨

叶国军

(惠州市惠电综合服务有限公司, 广东 惠州 516001)

摘 要 电力工程施工现场的接地系统承担泄放故障电流、稳定参考电位、抑制电磁干扰、保障人身设备安全等核心职能, 策略层面的统筹必须贯穿规划及施工全周期, 方可在多场景保持性能不衰减。本文围绕接地电阻、连接可靠性、均匀性及稳定性四个维度, 提出基于场地电性参数反演的前期勘测路径, 以期为项目策划、运维巡检提供参考。

关键词 电力工程; 接地技术; 故障排查; 接地电阻; 等电位

中图分类号: TM726

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.30.016

0 引言

在新能源并网比例持续提升、短路容量不断增长、站内电力电子设备密度显著提高的大背景下, 接地系统不再被视作单纯的配套构筑物, 而是承担多目标、多约束的关键基础设施, 其性能直接影响一次设备绝缘配合水平或二次系统抗干扰能力。传统靠经验选型、粗略布置、一次性验收的做法, 难以应对高频扰动、脉冲冲击等复杂因素导致的性能漂移问题, 亦难以在全寿期内维持既定指标。因此, 有必要在策略层面对接地系统开展系统化研究, 构建从场地勘测、施工管控、在线监测到故障闭环处置的完整链条, 同时通过量化指标驱动设计施工运维一体化优化, 以实现风险的前置消减及对异常的快速响应。

1 电力系统安全运行的核心需求

电力系统在发、输、变、配、用各环节依赖稳定接地来构建统一电位参考, 只有在接地网络持续保持低阻、低感、低接触电位抬升三项特征时, 保护动作整定才具备足够选择性, 自动化装置才可在强干扰环境下可靠通信, 人员可接触外露导电部分才不至于形成危险跨步电压^[1]。随着高比例电力电子装置注入, 谐波电流、共模分量、快速脉冲边沿进入站内母线, 若缺乏低阻低感路径, 噪声电流将经控制回路或屏蔽网反向耦合, 诱发误动或拒动。在雷暴强度上升、极端气象频发的形势下, 站区土壤含水率季节波动明显, 接触电压限值核算需要引入温度湿度因子, 才能保证在干季高温低湿极端工况仍满足人身安全阈值^[2]。同时, 城网密集走廊内跨越共地体数量增加, 地电位反击风险上升, 跨接导体连续性、接头耐久性等成为事故预防重点。接地系统处于半埋设状态, 隐蔽性极强,

必须通过周期性电气参数测量、目标化开挖抽检、在线传感辅助判断等手段获取健康状态, 再将数据纳入台账模型, 利用阈值告警及趋势分析实现预知维护。因此, 安全运行的核心需求可概括为三类目标, 即人身触电风险控制、一次二次设备绝缘保护、对外雷电及内部故障电流快速泄放, 同时必须在施工阶段落实质量可追溯, 在运维阶段落实状态可量化且形成端到端闭环。

2 接地系统的关键性能指标

2.1 接地电阻

接地电阻决定故障电流分流能力及电位抬升水平, 设计阶段应基于实测土壤电阻率梯度建立分层模型, 结合目标电阻值采用反演求解确定地极密度、导体截面, 必要时引入化学降阻材料或深井接地体以缩短收敛路径, 但须评估长期溶出影响及补维护成本^[3]。施工阶段需要保证埋深一致、回填介质均匀、焊接或压接处阻值不劣化, 回填前开展分段电阻校核可及早发现虚接漏接, 投运前通过三极法或改进电极布置完成全网测量, 雨季前后各取一次数据建立季节曲线, 长期观察可识别土壤含水率变化导致的波动, 再结合短时冲击试验验证极端工况表现。在城市受限空间, 可通过联合利用基础钢筋、桩基金属构件实现等效扩展, 同时设置绝缘节隔断杂散电流回路, 避免引入外部腐蚀源, 并在满足规范上限的同时留有裕度以适应老化腐蚀造成的缓慢上升。

2.2 连接可靠性

接地网络包含接地体、引下线、设备外壳跨接等多层连接点, 任何一处失效都可能导致电流分配异常或电位不均, 进而放大触电风险或噪声耦合效应。可靠性

构建首先依赖材料及工艺,裸铜、镀铜钢、热镀锌钢需匹配土壤环境,盐雾、酸碱、杂散电流暴露条件不同,选材策略亦应不同,连接方式在焊接、热熔、冷压之间需要根据截面及现场可达性择优,紧固件扭矩采用分级复核制度同时防松措施在振动源附近必须到位。依赖可追溯质量控制,建议编制等电位连接清单,逐点拍照留痕,记录压接模号、焊剂批次、作业人资质,再在隐蔽前完成阻值抽测,以数据化方式固化工艺一致性^[4]。

2.3 稳定性

稳定性是指指标随时间、气候、载流冲击保持可控波动,决定触电电位分布是否平滑、二次系统抗干扰是否稳健^[5]。需在平面布局阶段通过仿真评估支路电流密度,适当增设环形干线或等距辐射支线以改善边界区域电位梯度,设备集中区引下线宜就近汇入,避免长距离单线回流形成热点。稳定性依赖回填介质抗冲刷能力、导体防腐体系耐久性、连接工艺抗热循环能力,可通过在关键节点采用双路径并联、在易积水地段设置排水措施、在腐蚀性强土壤采用复合包覆材料来提升冗余^[6]。运维层面引入代表性测点,建立季节曲线及事件曲线,利用趋势偏离阈值触发现场复核,再根据原因采取局部增设接地极、替换劣化导体等修复动作。

3 典型故障类型及成因分析

3.1 接地电阻超标

接地电阻上升常以保护装置整定裕度被侵蚀、接地电位抬升明显、故障后复位缓慢等迹象出现,其根因多集中在场地电性变化、导体有效截面衰减、连接面状态劣化三类情形。干季长期少雨导致含水率下降,分层土壤在浅层形成高电阻外壳,因此深层导电通道被削弱,原本依赖表层回填介质的地极效果迅速折损。埋设多年的扁钢或圆钢在酸性土壤中发生点蚀,等效长度虽未变化,局部窄化却显著增加纵向阻抗,冲击电流通过时易在薄弱处形成过热印迹,同时连接点若存在压接未到位、焊渣未清理、紧固件防松缺失,微动氧化将以指数方式扩大接触电阻,外加短路故障热循环并且劣化速度进一步加快。施工偏差亦会放大问题,埋深不足导致季节冻胀影响、接地极间距未达设计值导致相互耦合,降阻效果被抵消。

3.2 接触电压 / 跨步电压异常

触电风险指标异常多见于设备集中区、走廊边界区两类位置,现象往往表现为同一短路电流下人体等效路径电压超过限值,或在雷暴后散点测值离散度增

大。造成异常的主因在于电位分布不均,既可能源自地网几何布局导致边缘梯度过陡,也可能源自表面覆盖层失效使人体接触阻抗被低估,若碎石层厚度不足或颗粒级配退化,鞋底等效电阻下降,限值校核需要重新引入接触条件修正。围栏、管廊支架、排水沟金属构件若未按等电位要求汇接,界面处将出现电位突变,人脚跨越时易形成高跨步差,因二次回路屏蔽未就近汇流杂散高频电流会沿意外路径扩散,在弱电设备操作面抬高局部电位。此外,外部系统接地体通过金属管线或基桩形成隐性耦合,故障电流经旁路进入站区,导致设计边界条件被破坏,校核模型失配。

3.3 接地失效

接地失效可分为“功能性失效”及“结构性失效”两个层面,前者指指标仍可测得但已无法满足泄流、限压目标,后者指导体连续性中断或大比例脱网。常见诱因多为市政开挖切断联络带,或新增管线占位等外力破坏,长期腐蚀同样致命,杂散直流叠加氯盐侵蚀会在土壤电位梯度较大的交界面产生阳极溶解,细小裂纹在冲击负荷作用下扩展为断裂。深井接地体若回填材料干缩,电极与围岩脱贴导致等效接触面积骤减,地极近区电场畸变严重。连接件失稳亦会触发级联问题,关键汇点松脱将改变全网电流分配,边缘支路被迫承载更大电流,进一步加快老化。

3.4 外部环境诱因

外界因素对接地系统影响呈长期累积态势,首先气候周期会改变土壤孔隙含水状态,干热季节电阻率抬升,雨季则因饱和渗透形成短时降低,设计裕度不足,指标将在年内呈现波峰波谷交替。冻土条件下表层导电性急剧下降,浅埋导体几乎失效,电流被迫下潜,且沿海或盐碱地带盐雾侵袭加剧腐蚀,裸露过渡区最为敏感,腐蚀速率将远高于内陆站点。城市轨道交通或阴极保护系统引入杂散直流,土壤电位呈定向偏移,地网在某些位置长期处于阳极状态,腐蚀风险倍增。周边建设活动亦会重塑边界条件,新建桩基与地网耦合、地下管廊形成大面积金属回路,外部故障电流可通过隐性路径介入,雷暴强度上升带来更高能量的冲击,材料疲劳加速。

4 电力工程施工中接地关键技术及故障排查优化策略

4.1 接地装置设计的精细化改进

设计阶段应以“可测、可调、可扩展”为目标,通过多深度、多方位电阻率采样建立分层等值模型,

再把目标接地电阻、触电限值两类约束纳入同一优化函数,采用迭代法反算地极密度及截面。站区平面宜设置主环及若干辐射支线,关键建筑周边形成紧凑闭合回路,边界区以加密布置平滑电位梯度,深井电极选用耐腐蚀材料并配套惰性回填,孔壁采用抗干缩工艺,井口设置检修口便于后续复测。考虑到环境不确定性,设计裕度按极端干燥季工况计算,再在雷暴条件下检核冲击电流密度,必要时对连接点配置双路并联以提高抗热循环能力,且对围栏、门禁、桥架等金属构件制定等电位汇接清单,明确引下线路径及汇入位置,减少孤立导体。在电缆系统方面,屏蔽层接地方式采用单端或交替策略由仿真验证后确定,全网预留分段测试点,敷设在线监测传感器通道,为运维期数据化管理打好基础。

4.2 施工工艺的标准化控制

施工质量决定地网初始状态,标准化控制需要从材料、工法、检验三条主线同步推进。材料进场执行批次抽检,导体化学成分、镀层厚度、降阻剂配方均需具有可追溯证据,沟槽成形保持设计埋深并控制回填密实度,回填介质含水率在封闭前复核确保导电性稳定。连接方式按截面选用压接或热熔,压接模号、压痕外观、收口长度逐项验收,热熔部位清渣打磨并加防腐包覆,紧固件施加规定扭矩并设置防松件。深井钻孔、下极、回填按工序见证,隐蔽前开展分段电阻测试及关键节点外观记录,测量环节采用标准布极距离,必要时设置不同方位复测以排除互扰。在靠近振动源或热源位置增设软连接或补强措施,降低热胀冷缩应力,完工验收除常规电气指标外,还应对触电限值进行现场校核,并出具季节性复测计划。

4.3 故障排查的分级、常态化机制

排查体系可划分为基础巡检、重点核查、事件响应三个等级,基础巡检面向全网以周期性低负荷测量为主,内容包含分段电阻、代表性接触电压、围栏连续性,频次依据站点风险画像动态调整。其中重点核查针对高腐蚀区、强耦合区两类敏感区域,采用扩大抽检比例及加密监测点方式,结合红外测温、动态阻抗跟踪识别早期劣化。事件响应用于短路故障、雷暴强袭、外部施工等触发场景,要求在限定时窗内完成临时复测及风险评估,必要时采取临时跨接保持连续性,再制定永久恢复方案。机制运行依赖数字台账,所有测值、影像等形成可追溯链路,通过阈值告警触发工单,再由闭环审核确认整改成效。人员层面设置持证上岗、能力复训制度,确保测试方法、数据判读

保持一致,跨部门协同方面建立周界信息共享渠道,外部施工告知、轨交运维联络纳入固定流程。

4.4 多技术融合的故障定位方法

单一测试往往难以在复杂土层与交错金属体环境中快速定位缺陷,多技术融合可显著缩短停电窗口并提高判断准确度。其中,基础直流电阻测试用于粗粒度筛查异常支路,随后施加低压脉冲开展时域反射,定位断点或高阻连接的距离。在需要识别掩埋深度及回填介质状态时,引入电阻率层析成像,对电流密度分布进行可视化,异常体将在成像上呈现高低阻对比。高频干扰或杂散电流问题,可用可调频注入法叠加小信号,配合磁场传感器进行路径追踪快速判断非预期环路。热成像擅长识别接触面局部发热,适合在带电状态下开展非接触巡检,无人机搭载磁通门或红外载荷可在大型站区完成快速扫描,结合地面测点完成互证,数据层面建立测量信息融合算法,产出置信度评分及处置优先级列表,通过组合拳策略定位将从“经验驱动”转向“数据驱动”,避免反复开挖造成的二次损伤。

5 结束语

接地系统作为电力工程的隐蔽基础设施,其价值体现在事故未发生之前,其风险却在环境波动、负荷变化、材料老化的长期作用中悄然累积。本文依据故障类型梳理成因脉络,提出从设计、施工、排查、定位四个维度协同优化的策略框架,强调以数据化台账统摄全寿命周期管理,以多源测量支撑快速决策,故障处置将从被动抢修转为主动预防,成本与可靠性之间将获得更稳定的平衡。

参考文献:

- [1] 樊卡,刘继文,卢俊甫.电力系统接地故障选线选段研判中的全数据判定技术应用分析[J].中国设备工程,2025(15):206-208.
- [2] 张弘.电力设备中的电气设备接地技术探析[J].电力设备管理,2025(14):53-55.
- [3] 张紫薇.电力系统中发电厂直流系统接地故障分析与处理[J].电气应用,2025,44(07):90-95.
- [4] 陶建军.电力工程施工现场临时用电及其安全技术应用分析[J].城市建设理论研究(电子版),2025(19):4-6.
- [5] 李耀坤.电力系统单相接地故障特性及电阻接地保护技术分析[J].电力设备管理,2025(09):32-34.
- [6] 陈功.电力工程中的接地施工控制技术分析[J].集成电路应用,2022,39(12):232-233.