水电站接地布设与电气运行防护保障

秦 祥
贵州北源电力股份有限公司 贵州 遵义 563400

摘 要：水电站接地系统是电气安全运行的核心基础，其布设质量直接决定设备稳定与人员安全。本文阐述水电站接地系统布设原理、分区施工方案及关键施工技术，剖析接地布设常见缺陷与隐患，构建系统化电气运行防护体系。结合实际工程案例，排查接地与防护运行问题，制定接地降阻、设备升级及运维优化方案，经改造验证，有效改善接地性能，提升水电站电气运行安全防护水平。

关键词：水电站；接地布设；电气运行；防护保障

引言：水电站工况环境复杂，潮湿腐蚀、水位波动、地质复杂等因素，易造成接地阻抗失衡、设备防护失效，引发触电、设备损坏、保护误动等安全隐患。接地布设与电气防护是水电站电力系统安全稳定运行的关键环节。为规范接地施工、强化运行防护，本文结合行业规范与工程实际，系统研究接地布设技术、电气防护体系及运维保障策略，针对性解决现场运行痛点，为水电站安全运维提供技术支撑。

1 水电站接地系统布设原理与关键技术

1.1 水电站接地系统核心理论

（1）电力系统接地基本原理涵盖工作接地、保护接地与防雷接地三大类别，其技术准则要求接地装置在故障电流入地时具备足够的热稳定性和机械强度，确保系统电位始终处于安全范围。（2）水电站特殊工况下接地系统呈现显著动态特性：水库水位涨落导致土壤电阻率季节性波动，水轮机组启停引发接地电流的暂态突变，潮湿环境与渗漏水条件加速接地体电化学腐蚀进程，这些因素叠加影响接地阻抗的长期稳定性。（3）接地电阻控制标准依据《交流电气装置的接地设计规范》（GB/T50065），大中型水电站接地电阻宜降至0.5Ω以下；跨步电压与接触电压的允许限值需结合地面覆盖层电阻率及故障电流持续时间综合计算，一般分别控制在50V和80V以内，以确保人员安全。

1.2 水电站主要区域接地布设方案

（1）厂房主体设备接地采用以主接地网为骨架、各机组环网为分支的网格化布设工艺，发电机中性点、变压器外壳、调速器及金属管道均须独立引接至接地干线，连接点采用放热焊接确保电气导通性。（2）升压站区域接地布设强调避雷针、断路器及互感器的联合接地，构架基础钢筋作为自然接地体充分加以利用；输电线路进出线段每基杆塔均设置垂直接地极，接地引下线沿塔身对称敷设以降低冲击阻抗。（3）库区泄洪闸门、边坡监测设备及启闭机辅助电气系统采用环形接地体围绕设备基础布设，并与主厂房地网通过镀锌扁钢可靠连通，水下部分选用不锈钢或铜包钢材质以增强抗腐蚀能力[1]。

1.3 接地布设常用材料与施工关键技术

（1）接地导体选型依据土壤腐蚀性等级确定：一般区域采用热镀锌扁钢或圆钢，强腐蚀环境选用铜排或铜包钢复合材料；降阻材料以石墨基膨润土及导电混凝土为主，其适配性需结合现场土壤电阻率测试结果进行工程配比优化。（2）深井接地施工采用钻机成孔至数十米基岩层，埋设垂直接地极并压力灌注降阻剂，适用于场地受限的高土壤电阻率区域；网状接地工艺则通过水平接地带纵横交叉敷设，形成均压屏蔽网格，网格密度依据预期故障电流分布经计算确定。（3）复杂地质条件下，针对砾石层、风化岩等不利条件，采取换填低电阻率土壤、增设外引接地极至水库水体、以及利用水工隧洞钢筋网辅助导电等综合优化措施，有效提升接地系统效能。

1.4 接地系统常见布设缺陷与隐患

（1）施工不规范主要表现为焊接质量不达标导致接头虚焊、埋深不足致使接地体受扰动移位、回填土未分层夯实造成接地体与大地的接触不良，这些问题直接引发接地电阻超标且整改难度较大。（2）接地体腐蚀源于地下杂散电流与化学介质的长期作用，加之部分区域未设置腐蚀监测装置，腐蚀减薄甚至断裂难以被及时发现，最终导致接地网局部孤岛效应，系统整体失效风险显著上升。（3）水电站改扩建中新旧接地系统衔接时，若未对原有地网进行全面调查与连通性测试，盲目接入将造成地网电位分布不均，甚至形成环流通道，带来差模干扰和继电保护误动作等隐蔽性安全缺陷。

2 水电站电气运行防护体系构建与保障措施

2.1 电气运行防护核心体系与防护类型

（1）过电压、漏电、短路防护构成水电站三大基本防护体系。过电压防护依托氧化锌避雷器、阻容吸收装置及避雷线分层配置，拦截大气过电压与操作过电压，发电机出口及主变高压侧装设专用避雷器作为第一道屏障；漏电防护依靠剩余电流动作保护装置快速切除故障，对水轮机层、大坝闸门启闭机等潮湿区域重点防护；短路防护通过断路器、熔断器与纵联差动保护、过流保护等多级配合完成故障快速隔离，确保选择性、灵敏性与速动性统一。（2）一次设备防护强调热稳定与动稳定裕度储备，主变配置差动保护、瓦斯保护、压力释放阀等主后备保护，GIS、断路器及互感器按短路电流峰值校验动稳定；二次设备侧重抗电磁干扰与电源冗余，采用屏蔽双绞电缆全程单端接地、隔离变压器隔离干扰及独立逻辑接地回路，确保微弱信号完整性，二次插件经瞬态抑制二极管抵御浪涌冲击[2]。（3）人身安全与设备安全防护形成协同机制：设备外壳可靠接地与等电位连接既保障绝缘承受短路电流，又能在单相接地时将接触电压降至安全限值以下；防护制度刚性执行确保两道防线联动，运行人员的绝缘靴、绝缘手套等个体防护器具定期试验合格，与设备防护构成人机互补的立体格局。

2.2 基于接地系统的电气运行防护技术

（1）接地系统对雷电过电压的泄放防护作用体现为：雷电流经避雷针、避雷线捕获后，通过独立且尽可能短直的引下线快速导入接地装置，经水平接地体与垂直接地极的组合扩散至大地深处。接地冲击阻抗越低、散流路径越顺畅，雷击残压越小，主变压器、发电机等核心设备遭受雷电反击过电压的风险越低，同时接地系统的等电位连接还防止了雷电在设备金属外壳之间产生危险电位差。（2）故障电流接地分流的设备保护原理在于：当发生相对地短路故障时，敷设于厂房混凝土底板及周围土壤中的网格化接地网提供多条并联泄流通道，将数千安培的故障电流均匀分散引入地下，有效降低地网任意位置的电位升高幅度，同时为保护装置提供可靠且幅值足够的零序电流信号，驱动断路器按整定时限快速动作切除故障，从而减少故障电流对设备绝缘的热损伤和电动损伤。（3）接地均衡电位对人身触电风险的防控机制依托密集均压网格的合理布设，当接地故障发生时，均压带使接地网地表电位梯度趋于均匀平滑，运行人员在设备旁正常操作或巡检时，两脚之间的跨步电压及手与脚之间可能出现的接触电压均被控制在规程允许限值以内，从源头上消除触电致伤条件，尤其在水轮机层、主变室等人员频繁出入区域效果显著[3]。

2.3 水电站电气运行常态化防护保障措施

（1）电气设备日常巡检采用“望闻问切”综合手段，运用红外热像仪测温、超声波局放检测、SF_6气体检漏及外观巡查，对断路器气室压力、变压器顶层油温油位、母线接头及电缆终端温度等关键参数实施动态趋势监测。隐患排查实行闭环管理，建立分级预警台账，对异常发热、异响、异味等征兆定性分析，追踪治理直至销号归档。（2）接地系统定期检测严格遵循DL/T475要求，按年度开展接地电阻、接触电压、跨步电压及设备导通电阻测试，春检、秋检期间各系统排查一次。对检测发现的地网局部锈蚀、断裂或焊接点松动等问题，及时采取补焊加固、增设垂直接地极或局部开挖更换腐蚀导体等措施，检测报告与技术档案同步录入设备全寿命周期管理系统，确保地网健康状态可追溯[4]。（3）电气运行防护制度涵盖操作票、工作票及交接班制度构成的“两票三制”管理体系，并建立防误闭锁、动火作业审批等专项制度。人员管控方面，按安全等级实施分级培训与持证上岗，每年组织全员紧急救护、灭火器使用及触电急救实操复训，每季度开展典型故障场景的反事故演习与桌面推演，通过安全责任考核机制将防护措施嵌入各岗位作业标准，确保全流程刚性落地执行。

3 工程案例分析与优化改进策略

3.1 工程案例概况

（1）以国内某大型抽水蓄能电站为分析对象。该电站于2009年投产，装机规模较大，主接地网初始设计接地电阻测量值为0.45Ω。电站地处山区，土壤以风化石土质为主，固水性能差、沙石粒偏多，多处山岩地段的土壤电阻率可达2000Ω·m以上。电气系统配置包括500kV开关站、地下厂房洞群、上水库及下水库等多区域接地网络。（2）现有接地系统采用主接地网与各分区地网联合布设方案，地网面积覆盖上水库约16000m²、中控楼及开关站区域8720m²、下水库约51000m²，地网最大对角尺寸接近2000m。电气防护体系配置了断路器保护、差动保护及过流保护等多级继电保护装置，但接地系统与防护设备之间的协调性存在不足。（3）2019年定期检测发现，主接地网接地电阻值升至0.69Ω，较投产时增加约53%，已超出《交流电气装置的接地设计规范》（GB/T50065）规定的0.5Ω限值要求。同时，跨步电压和接触电压亦存在超标风险。设备运行中曾出现因接地不良引发的保护装置误动及局部设备发热异常，严重威胁电站安全稳定运行。

3.2 接地系统与电气防护问题检测分析

（1）接地电阻测试采用工频大电流法，测得主接地网

接地电阻0.69Ω；接地完整性导通测试发现多处设备接地引下线与主地网连接点存在松动和氧化现象，部分水平接地带截面因腐蚀出现明显缩减。经计算分析，电站高压系统发生短路时地电位升可达6.28kV，对人身和设备安全构成严重威胁。（2）电气防护装置运行缺陷主要表现为：部分继电保护定值整定未充分结合接地网实际状态，导致故障时保护动作选择性不足；GIS设备外壳环流经接地网回流时，因接地阻抗偏高引发局部发热和绝缘加速老化；发电机定子接地保护曾因参数设置不当出现误报警和误动作。（3）工况环境对防护系统的影响显著：电站周边多为岩石山地，高土壤电阻率直接制约接地散流效果；水库水位季节性涨落导致土壤电阻率大幅波动，接地阻抗呈现动态变化；高湿度环境中接地体长期遭受电化学腐蚀和杂散电流侵蚀，加速导体性能劣化。

3.3 系统优化改进方案

（1）接地布设优化采取综合降阻策略：在生产营地及水库水下区域新增接地网，通过铜绞线将新增地网接入主接地网；在上游水库敷设水下接地网，并在两岸埋设DK-AG/F防腐电解地极以降低河床土壤电阻率；针对高土壤电阻率区域增设深井垂直接地极，采用压力灌注降阻剂工艺。（2）电气防护设备升级方面，对发变组保护装置进行全域迭代升级，优化定子接地保护参数配置；对GIS设备接地回路进行专项整改，降低外壳环流对设备的危害；完善防误闭锁管理系统，提升故障快速隔离能力[5]。（3）运维管理体系完善措施包括：建立接地系统全寿命周期管理档案，实施年度接地电阻、接触电压及跨步电压定期检测制度；利用CDEGS软件对地网进行仿真计算和状态评估；开展运行人员专项培训与应急演练，将接地系统检测纳入日常巡检标准化流程。

3.4 优化效果验证与分析

（1）改造后经现场实测，主接地网接地电阻由0.69Ω降至0.388Ω，满足不大于0.5Ω的设计要求；跨步电压和接触电压经CDEGS仿真计算及现场验证，均满足规程允许值。地网散流性能和整体导通性得到显著改善。（2）电气设备运行安全稳定性明显提升：接地阻抗降低后，设备外壳接触电压有效控制在安全限值以内；GIS设备局部发热问题得到缓解，保护装置动作可靠性增强；机组定子接地保护误动率显著下降。（3）防护体系整体运行效益突出：改造后接地系统满足接地阻抗、跨步电压、接触电压等国家规程要求；运维管理体系的完善实现了接地系统健康状态的可测、可控、可追溯；综合降阻措施兼顾了技术可行性与经济合理性，为同类水电站接地系统改造提供了可借鉴的工程范例。

结束语

本文系统梳理了水电站接地布设关键技术与电气运行防护体系，结合工程实例完成问题排查与优化改造实践。通过优化接地布设、升级防护设备、完善运维机制，有效解决接地电阻超标、防护可靠性不足等问题，显著提升电站电气系统运行稳定性。此次研究形成的施工、运维、改造一体化方案，可为同类水电站接地优化与电气防护工作提供实用参考，助力水电行业安全标准化发展。

参考文献

[1]王军,李刚,张宇.复杂地形水电站接地网优化布设及降阻技术研究[J].电网技术,2023,47(07):2561-2568.

[2]刘凯,陈铭,周航.大型水电站等电位接地网设计与电气安全防护策略[J].电力系统保护与控制,2024,52(11):278-285.

[3]张海波,吴杰.水电站接地网腐蚀缺陷检测与运维防护技术优化[J].高电压技术,2022,48(09):3215-3222.

[4]李明远,田亮.雷电冲击下水电站接地系统响应特性及防护优化[J].水电能源科学,2023,41(08):187-190.

[5]高璐,解辰,王含羽.水电站二次等电位接地网的设计与敷设[J].自动化应用,2023,64(18):157-161.