

极端气候条件下变电站设备可靠性提升技术研究

闫世杰 张彬 高慧忠 曹强 周继业

乌兰察布供电公司 内蒙古乌兰察布 012000

摘要:近年来,极端气候事件呈现频次增加、范围扩大、强度增强等特点,而高温、寒潮、暴雨、风沙等对电力系统产生了巨大冲击,导致变电站各类关键设备在非设计环境下更易出现故障与性能衰减的风险。现有变电站设备长期依赖常规气候工况进行设计与运维,在面对复杂、突发环境时,暴露出散热能力不足、绝缘失效、结构脆弱及材料腐蚀等多重问题,影响电力系统的安全稳定运行。针对上述问题,本文从结构与材料适应性提升、防水排涝能力强化、智能监测体系构建、运维策略优化等方面提出对策,以增强设备对极端气候的响应能力与环境适应性。本文认为,多维度协同提升技术体系,可有效改善设备在极端环境下的运行稳定性与寿命表现,为构建具备高可靠性与韧性的电力基础设施提供支撑。

关键词:极端气候;变电站设备;可靠性;提升技术

极端气候事件在近年愈加频繁,高温持续、寒潮突发、暴雨洪涝、强风沙尘等现象,已成为影响电力系统安全运行的重要因素。作为电能输配体系的关键节点,变电站承担着电压转换、功率分配及保护控制等核心功能,其运行状态直接关联供电的可靠性与电网的稳定性。然而,在极端气候条件下,变电站设备长期承受温度、湿度、风压及颗粒污染等外部应力冲击,表现出绝缘退化、结构变形、腐蚀加剧、误动作率提升等复杂失效模式。传统设备的设计与材料选择多以常规环境为依据,对极端及快速变化的气候工况适应力不足,亟需优化。随着全社会对电力可靠性要求的提高,强化变电站设备在极端气候下的可靠性,已成为重要研究方向。围绕典型气候条件下的可靠性不足现象,系统识别关键设备的薄弱环节,提出具备可实施性的提升技术体系,是保障未来电力系统韧性运行的重要一环。本文聚焦设备层面问题,结合结构设计、防护强化、智能监测与运维升级等方向展开,以期变电站设备在复杂气候环境下的安全运行提供参考。

1 极端气候条件下变电站设备面临的可靠性问题

1.1 高温与热浪环境对设备运行的影响

炽热天气条件下,变电站内部温度场往往呈现高度不均状态,主变压器与电缆最易承受额外热负荷,内部油温持续攀升,使散热通道的工作效率大幅下滑。散热结构一旦受外界高温扰动,内部温升趋势呈加剧态势,油纸绝缘体系在热应力与时效叠加下逐渐失去原有介电性能,局部电场分布随之发生微妙变化。与此同时,固体绝缘材料因长期处于高

温环境,其微观结构趋于疏松,介质损耗升高,局部放电现象时有发生,放电点的能量疏散不均,还会推动绝缘退化的进一步演化。再者,高温情势下的控制设备也呈现特定运行风险。电子元件在持续受热时,参数漂移较为明显,动作整定点易产生偏移,保护装置误动作概率随之升高,时而出现无故跳闸与逻辑判断偏差,影响电网调度的连贯性。开关触头受热后,表面氧化极为快速,接触压力在热膨胀效应影响下出现微弱偏移,通断行为略显迟滞,局部电弧倾向增强。柜体内部空气循环受环境抑制,散热不畅,储能元件性能滑落,开关设备在负载转换时呈现较强的热响应效应。综上,高温与热浪情境下所呈现的热电机械多重影响,使设备处于一种微妙而复杂的状态中。

1.2 极寒及覆冰条件下的结构脆弱性

严寒环境使金属构件进入低韧性区间,晶格层次愈发紧密,内部微裂纹在循环应力下呈缓慢扩展趋势。温度骤降使支架、母线固定件受热胀冷缩的反复作用,机械强度呈下降态势,焊缝处尤为敏感。覆冰天气更添新层压力,冰层自导体表面附着后,其重量随时间递增,支撑部件承受的额外载荷持续放大,母线、引线,甚至出现因不均受力而发生断裂的情形。在此过程中,绝缘子表面覆冰,悄然改变了电气间隙与外形轮廓,湿滑介质附着后使放电路径变得更为复杂。电气间隙缩短意味着击穿电压随之下降,闪络事件呈频发态势,局部电弧漂移现象加剧,不稳定状态不断积累,使线路与站内设备处于更高风险区间。寒冷环境下,操作机构润滑

状态受影响, 润滑脂趋于黏稠, 机械传动链的响应速度变慢, 合分闸动作不再利落, 导致时间参数发生偏移。部分设备内部元件因环境温度偏低, 出现脆性断裂倾向, 使结构安全边界呈收缩态。低温情境还会使电缆护套变硬, 弯曲性能下降, 局部应力集中区域衍生出潜在裂纹。

1.3 洪水、暴雨与高湿条件引发的绝缘失效风险

强降雨或暴雨侵袭时, 变电站区域频繁积水。水体侵入控制柜、继电保护装置后, 电子元件失去原有干燥环境, 功能呈现紊乱, 继电器触点吸附水汽, 联动逻辑判断不再稳定。湿热环境下, 绝缘体表面电导率抬升, 局部区域表面电压梯度改变, 使击穿路径呈现随机性。接地系统被淹会使接地电阻不再保持原值, 分流规律随水体布置而出现变化, 过电压在系统内反馈路径变得复杂, 稳定性略显动荡。电缆沟中积水使护套长期受潮, 绝缘层内部水分渗透提高介质损耗, 局部升温现象随之显现。导线外皮受水蚀后, 表面微孔扩大, 深层绝缘逐步受影响。凝露则在密闭柜内悄然形成, 冷暖空气交替使水珠附着在绝缘体表面, 绝缘水平时高时低, 表面放电更易发生^[1]。继电保护装置因湿度变化而呈现参数漂移, 误动或拒动现象造成调度控制链条出现波动。绝缘子在高湿环境下, 憎水性衰减较快, 污秽颗粒附着呈现扩大趋势, 表面形成导电通道, 闪络倾向升高。湿空气入侵封闭空间, 使金属件产生轻度腐蚀, 接触电阻悄然上升。

1.4 风沙、盐雾等特殊环境导致的材料老化与腐蚀问题

风沙环境中, 细颗粒在高速气流携带下撞击设备外表, 涂层遭受磨蚀, 表面粗糙度提升, 随后更易累积尘屑。金属暴露区域在空气作用下容易产生氧化现象, 接触电阻随时间而上升, 使导电连接状态愈发敏感, 局部热量难以扩散, 热积现象在局部表面呈现出明显趋势。绝缘子在沙尘附着后, 表面电场分布出现微妙变化, 污染层在潮湿空气影响下形成薄导电膜, 使表面放电模式趋于复杂。砂粒磨损造成微裂纹滋生, 使介电强度下降。盐雾环境中, 含盐微滴携带腐蚀因子在设备外表附着并迅速侵蚀金属表层, 腐蚀产物在接点处堆积, 导电路径随之不再稳固。盐分与金属作用产生氯化氯化复合膜, 使结构能级变化, 表层剥离趋势增加。绝缘子表面的盐分沉积影响爬电距离, 电气间隙的有效性受损, 闪络更易发生。高湿条件下, 盐分溶解成电解液, 使金属表面电化学反应加速, 材料寿命呈现缩短。外露电缆护套因长期受侵蚀而出现硬化、龟裂, 局部光滑性不再, 使机械强度呈下

降倾向。沙尘与盐雾彼此交织, 使外表污秽累积更快, 局部过热与微放电呈交替态势, 进而让设备在运行过程中的稳定性下降。

2 提升变电站设备在极端气候条件下可靠性的技术路径

2.1 优化设备结构与材料设计, 增强环境适应性

在设备结构配置初期, 应针对不同气候带划分热设计等级, 将环境热参数与绝缘耐温参数进行配对, 并选取热导率高、热容量大的金属基材料作为核心散热元件, 在壳体内嵌导热通道, 增加热交换面积。在变压器油箱与风冷单元间增设散热栅格, 提高气流通透性, 必要时将风冷控制策略从时间制改为温控响应式, 使散热路径随实时工况自动重构。高温地区的 GIS 室内设备应调整腔体布局, 利用热流模拟对高温积聚区进行主动导热排布, 消解热峰值。针对寒冷区域, 应为结构外壳设置柔性复合保温层, 并在紧固部位引入螺纹缓冲层, 避免低温引起的刚性破裂^[2]。需选用低脆性复合材料替代金属连接部件, 在支撑结构内嵌远红外加热元件, 形成被动加热腔, 同时在设备边缘设置点热源, 以点面结合方式逐层抵御冰冻侵袭。应对盐雾场景, 应使用高密封等级外壳, 喷涂双层无机硅树脂涂层, 同时内侧采用陶瓷面微纹复合材料形成电气隔离带, 减缓盐离子渗透路径。此外, 处于高原或沿海高湿区域的设备, 应在设计阶段引入局地气候模型, 将气压、辐射、风速、雾滴频率等环境参数, 纳入器件初始参数设定, 并根据区域历史失效案例修正各类元器件承载限值, 完成定制型设计, 避免通用标准在局地工况下偏离失衡。

2.2 强化防水排涝与防潮设计, 提升水害防控能力

在变电站总体布局设计时, 应依据年最大积水深度设定设备安装标高, 将关键运行设备基座抬高至极端暴雨回测线以上 0.8 米, 并在站区外围开设两级导流渠, 内圈采用仿生曲线导水设计, 外圈设置沉淀缓冲池并引入自流泵吸系统, 实现快速溢流转移。站内布线采用桥架高架方式避免线缆落地, 并在站区低洼点布设独立水位感应模块, 建立局部水体监测网络。对于户外柜体, 应提升整体密封等级, 外壳边缘采用一体化成型结构, 取消螺纹拼接处易进水区域, 门缝处加装弹性密封胶垫, 在门框处设置多级挡水槽, 利用毛细虹吸结构将微水导向引流孔^[3]。柜内接口采取防水包覆焊接工艺, 并增加不锈钢滤气孔, 提高气压平衡性, 避免内部湿气滞留。电缆沟段应植入低功耗抽排系统, 在电缆下层铺

设排水管路并引入重力式反虹吸装置,形成被动抽水机制,水位超过设定值时自动激活水泵抽排。各关键节点增设凝露报警模块,一旦湿度波动超过阈值,立即联动启动除湿系统。配电柜与控制柜内侧则嵌入智能除湿膜,实现空间湿度常态调节,并结合智能加热器控制内外温差,切断凝露前提条件。

2.3 应用智能传感与监测技术,构建状态感知系统

在站内设备关键节点安装分布式多维度传感器网络,布设点位应覆盖高热负载区、易腐蚀接口、支撑节点与低通风区域,传感器类型涵盖温湿度、振动频谱、电弧感知、局部放电检测、气压波动及微电流泄漏监控等模块。传感器数据实时采集后,经边缘网关进行初步降噪、筛选与异常归类,按优先级推送至数据处理中心。调度端构建云边协同的数据平台,将原始监测数据同步上传至调控平台,利用滑动窗口算法与 CNNGRU 深度预测模型融合运行历史、环境变量与实时状态参数,动态演算设备老化趋势曲线与异常演化路径^[4]。状态识别部分采用时序聚类识别机制,将设备状态按健康等级划分为稳定、过载、潜变与临界状态,并为每一节点设定动态响应门限值。监测平台与站控系统实现互通后,状态报告以时域形式滚动发布,结合站内巡检数据,自动生成定向维护建议。维护管理系统依据风险等级推送工单,预设维护窗口并自动调配资源,形成“监测判断响应”闭环链路。设备运行员可根据状态趋势图进行维护顺序重排,调度中心则根据设备状态变化趋势调整运行策略,实现数据引导下的主动式管理。

2.4 升级运维策略与应急机制,增强运行韧性

在既有调度体系中引入气象监测嵌套层,构建气象设备联动预警平台,将国家级气象数据站与区域微气象站数据接入设备调控中心,建立极端气候事件敏感参数库,预设温升、风载、水位、腐蚀浓度等五级预警等级,并为每类设备匹配多层响应逻辑^[5]。在预警系统启动后,调度系统对状态数据执行优先轮询策略,优先扫描处于风险阈值临界区的设备节点。运维端采用基于状态的检修调度策略,将日常巡视替换为多频次局部深度检查。维护任务不再按周期派单,而是依据状态动态下达,并联动人力排班系统实时调整人员配置。设备检修时序随状态轻重级别自动调整,运维工单优先覆盖

负载高、故障潜势大、监测指标波动频的设备区域。设立区域级应急维修小组,配置移动维修车与便携式巡检终端,快速响应高风险节点报警。储备中心引入数字化资产平台,构建“应急备件云仓库”,统一管理各类替换器件、标准接口、紧急配件,按需预设分布式转运路径。模块化设备更换系统则构建标准化插接件结构,使现场更换设备时无需大规模拆解,实现高强度环境下的快快切换。

3 结语

在极端气候趋势持续深化、电力系统运行边界不断拓展的背景下,变电站设备所面临的环境适应性压力已不再是偶发现象的干扰,而逐步转化为常态运行所必须正视的基础问题。高温、严寒、湿害、腐蚀等典型气候条件,设备的热、电、力多场协同失稳已成为影响其长期运行质量的关键症结。从设备层面出发,围绕结构布局、材料选择、防护设计与运行策略的协同优化,构成了提升其环境适应性的技术路径主线。在应对复杂工况的过程中,主动感知、分布式响应与数据驱动的运维机制,将逐步替代静态规则与经验判断。构建一个具备高度响应力与柔性治理能力的设备运行体系,需要贯穿从设计源头到运行末端的全周期统筹与协同调度。以工程实践为基础、以数据支撑为核心、以可靠性提升为目标的技术体系,将在未来极端气候背景下,为变电站设备的稳定运行构筑起更加坚实的技术支柱。

参考文献:

- [1] 徐青亚.箱式变电站在极端气候条件下的可靠性分析[J].电子技术(上海),2025,54(03):380-382.
- [2] 李雪,张涵帅,姜涛,张儒峰,陈厚合.应对极端冰灾的电力系统多阶段韧性提升策略[J].电力自动化设备,2024,44(07):1-7.
- [3] 杨艳明.基于物联网的10kV变电站电力设备健康状态自动监测方法[J].自动化应用,2024,65(20):82-84.
- [4] 梁允,李哲,石英,杨亚锡.基于模糊贝叶斯网络的变电站动态汛情风险评估[J].高电压技术,2023,49(S01):153-159.
- [5] 张官鹏.基于深度学习的变电设备状态监测与故障诊断技术分析[J].集成电路应用,2024,41(05):228-229.