

不同环境因素对电力变电设备故障的影响及处理方案

杨 慧¹ 丁 一² 张 源³

1. 内蒙古电力（集团）有限责任公司呼和浩特供电分公司 内蒙古 呼和浩特 010010
2. 内蒙古电力（集团）有限责任公司乌兰察布供电分公司 内蒙古 乌兰察布 012000
3. 内蒙古电力（集团）有限责任公司鄂尔多斯供电分公司 内蒙古 鄂尔多斯 017000

摘 要：电力变电设备是电力系统核心，承担电压变换等关键功能，其可靠性影响系统安全与效率。变电设备运行环境复杂，温度、湿度、污染、机械振动、电磁干扰等环境因素均可能引发故障，其中温度、湿度和污染是主要诱因。本文从设备设计、运行维护和环境控制三方面提出不同环境因素的处理方案与预防措施，并给出实施策略与建议，以提升设备环境适应性。

关键词：电力变电设备；环境因素；故障影响；处理方案；运维管理

1 电力变电设备在电力系统中的作用

电力变电设备是电力系统的核心组成部分，承担着电压变换、电能分配、潮流控制及系统保护等关键功能。在电力传输过程中，由于发电厂输出的电压等级较高（如220kV、500kV），而终端用户（如居民、工业负荷）所需的电压等级较低（如220V、380V），变电设备通过变压器实现电压的升降转换，从而降低传输损耗并满足不同场景的用电需求。例如，高压输电线路通过变电站降压后，电能可分配至城市配电网，再经配电变压器进一步降压至用户侧电压。变电设备中的断路器、隔离开关等开关设备，能够在系统故障时快速切断故障电流，防止事故扩大；而电容器、电抗器等无功补偿装置则用于调节系统电压和功率因数，维持电网的稳定运行。变电设备的可靠性直接影响电力系统的安全与效率。若变压器发生故障，可能导致局部区域停电甚至电网解列；开关设备拒动或误动可能引发连锁故障，造成大面积停电事故^[1]。因此，变电设备的设计、运行和维护需严格遵循技术标准，以适应电力系统高电压、大容量、远距离传输的发展需求。随着智能电网的推进，现代变电设备还集成了传感器、通信模块和智能控制单元，实现了设备状态的实时监测与自适应调节，进一步提升了电力系统的灵活性和抗干扰能力。例如，智能变压器可通过调节分接头位置动态优化电压质量，而数字化变电站则通过IEC61850协议实现设备间的信息共享与协同控制，为电力系统的智能化转型提供了硬件基础。

2 环境因素对电力变电设备故障的影响分析

变电设备的运行环境复杂多样，温度、湿度、污染、机械振动、电磁干扰等环境因素均可能引发设备性能劣化或故障。据统计，环境因素导致的设备故障占比

超过40%，其中温度、湿度和污染是主要诱因。

2.1 温度因素对变电设备故障的影响

温度是影响变电设备寿命和性能的核心因素。变压器、电抗器等设备在运行中会产生热量，若散热不良或环境温度过高，会导致设备内部温度升高，加速绝缘材料的老化。例如，油浸式变压器的绝缘纸在120℃下老化速率是80℃时的64倍，长期高温运行会显著缩短设备寿命。高温还会使变压器油的酸值升高、击穿电压下降，增加内部放电风险。对于开关设备（如SF6断路器），高温可能导致气体压力升高，引发密封失效或绝缘击穿；而低温则可能使气体液化，影响灭弧性能。温度波动还会引发设备热胀冷缩，导致连接部位松动或绝缘子开裂。例如，铜母线与铝导体的连接处因膨胀系数差异，在温度剧烈变化时易产生间隙，引发局部过热甚至电弧放电。据研究，当环境温度每升高10℃，设备故障率平均上升15%，凸显了温度控制的重要性。

2.2 湿度因素对变电设备故障的影响

湿度过高会导致设备表面凝露或绝缘材料吸湿，显著降低绝缘性能。例如，当空气相对湿度超过85%时，瓷绝缘子表面可能形成水膜，使泄漏电流增大，引发闪络事故；而复合绝缘材料（如硅橡胶）吸湿后，其憎水性会丧失，导致污闪电压下降50%以上。高湿度环境还会加速金属部件的腐蚀，尤其是户外设备（如断路器操作机构、接地网）在盐雾或工业污染协同作用下，腐蚀速率可提升3-5倍。湿度波动同样具有危害性^[2]。在昼夜温差大的地区，设备内部可能因呼吸作用吸入潮湿空气，导致绝缘件内部受潮。例如，变压器套管内部凝露会引发局部放电，最终发展为绝缘击穿。研究表明，湿度每增加10%，设备绝缘故障率上升8%，且故障多发生在潮湿

季节或雨后。

2.3 污染因素对变电设备故障的影响

空气中的粉尘、盐雾、化学气体等污染物会附着在设备表面,形成导电通道或腐蚀介质。在重污染地区(如化工园区、沿海区域),绝缘子表面沉积的污秽层在潮湿条件下会大幅降低绝缘强度。例如,清洁绝缘子的污闪电压可达100kV/cm,而严重污秽时可能降至10kV/cm以下,极易引发闪络事故。据统计,我国因污闪导致的停电事故占全部事故的12%,其中70%发生在重污染区域。污染物对金属部件的腐蚀同样不可忽视,工业废气中的 SO_2 、 NO_x 会与水分结合生成酸性物质,腐蚀设备外壳、接地装置和导电连接件。例如,铜导体在含硫环境中会生成硫化铜,导致接触电阻增大并引发局部过热;而钢铁结构在盐雾环境下可能发生点蚀,降低机械强度。

2.4 其他环境因素对变电设备故障的影响

除温度、湿度和污染外,机械振动、电磁干扰、动物活动等因素也会影响设备可靠性。例如,变压器铁芯松动或开关设备操作产生的振动,可能导致绝缘子裂纹或螺栓松动;而强电磁场可能干扰智能设备的通信模块,引发数据传输错误。此外,鸟类筑巢、蛇鼠攀爬等动物活动可能造成设备短路或接地故障,据统计,动物因素导致的故障占比约5%,但多发生在偏远地区或无人值守变电站。

3 不同环境因素的处理方案与预防措施

针对环境因素引发的故障,需从设备设计、运行维护和环境控制三方面制定综合措施,以提升设备的环境适应性。

3.1 温度因素的处理方案

优化设备散热设计是有效控制温度的核心手段。对于变压器而言,可采用强迫油循环风冷(OFAF)或者水冷方式,通过强制对流加速热量散发,显著增强散热效率,确保变压器在长时间高负荷运行下仍能保持稳定温度。对于开关设备,可增加散热片数量或扩大散热面积,同时采用低导热系数的绝缘材料,减少热量在设备内部的积聚。另外,合理规划变电站布局至关重要,应避免设备密集排列导致局部热量难以散发,可将大容量变压器布置在通风良好的区域,并设置遮阳棚减少太阳辐射对设备的影响。运行中需加强温度监测与调控,安装红外测温仪或光纤测温系统,实时监测设备关键部位的温度变化。结合智能控制系统,根据温度数据自动调节冷却装置运行状态,例如当变压器顶层油温超过85℃时,立即启动强迫油循环泵加速散热;当环境温度低于-10℃时,开启加热器防止 SF_6 气体液化,保障设备正常

运行。

3.2 湿度因素的处理方案

控制环境湿度需从防潮和除湿两方面综合入手。在设备设计阶段,采用密封结构至关重要,如达到IP65防护等级,可有效防止潮湿空气侵入设备内部。对于户外设备,涂覆憎水性涂料(如RTV硅橡胶)是不错的选择,它能减少水膜在设备表面形成,降低因水膜导致的绝缘性能下降风险^[3]。运行中,定期检查设备密封性能不可或缺,及时更换老化密封圈,确保密封效果。在潮湿季节,启用移动式除湿机或安装变电站专用除湿装置,将室内相对湿度严格控制在60%以下。针对已受潮设备,需进行专业干燥处理。例如对变压器进行热油循环干燥,利用高温热油带走设备内部水分;对绝缘子进行超声波清洗后烘干,恢复其绝缘性能;对于金属部件,采用喷砂除锈后涂覆防锈漆的工艺,恢复防腐性能,延长设备使用寿命。

3.3 污染因素的处理方案

抑制污染需将防污闪和防腐蚀措施紧密结合。在设备选型阶段,优先采用防污型绝缘子,如大爬距瓷绝缘子或硅橡胶复合绝缘子,这类绝缘子的污闪电压较普通绝缘子提高30%-50%,能有效抵御空气中污染物对绝缘性能的影响。对于金属部件,可选用不锈钢或热镀锌钢材,并涂覆防腐涂料(如环氧富锌漆),增强其抗腐蚀能力。运行中,定期清扫设备表面污秽是关键,例如每季度对绝缘子进行带电水冲洗或涂抹防污闪涂料(如PRTV),保持设备表面清洁。针对化学污染,需加强环境监测与设备防护。在化工园区附近变电站,安装气体检测装置实时监测 SO_2 、 H_2S 等有害气体浓度,当浓度超标时,立即启动通风系统或采取隔离措施,减少有害气体对设备的侵蚀。对于已腐蚀设备,采用电化学修复技术(如阴极保护)或更换耐腐蚀材料,恢复设备性能。

3.4 其他环境因素的处理方案

针对机械振动问题,需从设备安装基础和固定方式两方面进行优化。在变压器底部安装减震垫,能有效减少振动传递,降低振动对变压器内部结构的损伤。对开关设备操作机构进行定期紧固,防止螺栓松动,确保设备运行的稳定性。对于电磁干扰,可采用屏蔽电缆或加装滤波器。屏蔽电缆能阻挡外部电磁信号的干扰,加装滤波器则可过滤掉特定频率的干扰信号,降低智能设备的误动作率,保障设备准确运行。防范动物活动需结合物理隔离和驱离措施。在变电站围墙安装防鼠板、捕鸟器,并在设备周围设置驱蛇粉或超声波驱鸟器,阻止动物进入设备区域。对电缆沟道进行封堵,防止小动物钻

入破坏电缆。定期巡检设备外壳，及时修复破损部位，避免动物筑巢或啃咬，确保设备安全运行。

4 实施策略与建议

为系统化应对环境因素对变电设备的影响，需从管理、人员和技术三方面构建长效机制。

4.1 设备管理与维护策略

建立全生命周期管理体系是提升变电设备环境适应性的关键举措。从设备选型环节就要充分考虑环境因素，比如在污染严重地区，优先选用防污型设备，这类设备在绝缘设计、表面处理等方面具有特殊工艺，能有效抵御污染物侵蚀；在高温地区，采用耐热绝缘材料，确保设备在高温环境下仍能保持良好的绝缘性能。安装调试阶段，要严格按照规范操作，保证设备与环境的适配性。运行维护时，制定差异化维护策略至关重要。根据环境风险等级调整巡检周期和检测项目，像沿海变电站，由于空气盐分含量高，对绝缘子的腐蚀性强，应将绝缘子清扫周期从每年1次缩短至每季度1次。推行状态检修模式，借助在线监测和数据分析预测设备故障。利用油色谱分析监测变压器内部故障，通过局部放电检测评估绝缘状态，结合大数据平台建立设备健康档案，为维护决策提供科学依据。

4.2 人员培训与应急响应

加强运维人员环境适应性培训是保障变电设备稳定运行的重要环节。要让运维人员熟练掌握温度、湿度、污染等环境因素的监测方法和处理技能，开展红外测温、绝缘电阻测试等实操培训，通过实际操作提升他们的故障诊断能力，使其能够准确判断设备在复杂环境下的运行状态。定期组织应急演练也必不可少，模拟高温、暴雨等极端环境下的设备抢修流程，让运维人员在实战中熟悉抢修步骤，提高应对突发情况的能力，从而缩短故障恢复时间，减少停电损失。建立环境风险预警机制，与气象部门共享数据，提前获取恶劣天气信息。在台风来临前加固户外设备，防止设备被吹倒损坏；在

暴雨期间加强排水系统检查，避免积水导致设备短路；制定高温限负荷方案，避免设备过载运行，保障设备安全。

4.3 监测与预警系统的完善

构建多参数环境监测网络是提升变电设备环境监测水平的基础。在变电站内合理布设温度、湿度、污染物传感器，实时采集环境数据并上传至监控平台，实现对变电站环境的全方位、实时监测。通过机器学习算法分析历史故障与环境因素的关联性，找出影响设备运行的关键环境因素，优化预警阈值。例如，当湿度连续2小时超过80%且温度低于10℃时，自动触发凝露预警并启动除湿装置，防止设备因凝露而发生故障。推广智能巡检机器人，替代人工完成高危环境下的检测任务^[4]。配置红外热成像和局部放电检测模块的机器人，可24小时不间断巡检设备温度和绝缘状态，不仅提升监测效率，还能避免人工巡检在高危环境下可能面临的危险，保障运维人员的人身安全，进一步提升电力系统的可靠性。

结束语

电力变电设备作为电力系统的关键支撑，其稳定运行关乎能源供应安全。环境因素作为引发设备故障的重要诱因，需通过全生命周期管理、状态检修、人员培训、智能监测等综合措施加以应对。未来，随着新材料与数字技术的深度融合，变电设备的环境适应性将持续提升，为构建智能、高效、韧性的现代电网提供坚实保障，助力能源行业高质量发展。

参考文献

- [1]李云鹏,周雪.环境因素对变电站设备故障率的影响及对策[J].电力系统与自动化,2021,39(7):88-95
- [2]刘志强,张晓东.温湿度变化对变电站电力设备影响的研究[J].电力技术,2022,46(5):102-110
- [3]陈涛,王丽娜.空气污染对变电站设备运行稳定性的影响分析[J].电力设备与自动化,2023,41(3):45-53
- [4]杨军景,乔王瑜,李豪,等.不同极端环境下变电站设备可靠性评估[J].环境技术,2024,42(10):53-59+80.