

电力变电站运行设备发热的原因与对策

张红超

内蒙古电力集团公司乌海供电公司变电管理处, 内蒙古 乌海 016000

摘要: 新型电力系统建设背景下,区域用电负荷峰谷差持续拉大,变电站主变、高压隔离开关、开关柜、电缆终端等一次设备长期处于重载、满负荷运行状态,设备过热缺陷已成为引发绝缘击穿、相间短路、站内停电乃至电力火灾的高频隐患。常规运维多依靠周期性红外测温、故障事后消缺,仅能处置显性局部高温,对负荷、环境、机械老化、电能质量多重因素耦合形成的隐性温升缺乏预判手段,缺陷反复出现、治理不彻底问题突出。本文突破单一部件故障分析思路,按照接触损耗发热、电磁本体发热、环境诱导温升、电网工况诱发过热四大故障类别划分,从安装工艺、机械老化、外部环境、运维短板、电网运行参数五个维度拆解多层次发热机理;创新提出态势感知智能监测、分设备差异化技改、负荷动态均衡调控、发热风险分级管控、全生命周期闭环运维五位一体综合防控体系,引入温升速率预警、多参量耦合研判、季节性专项运维等原创管控手段,兼顾老旧变电站低成本改造与新建智能站数字化升级需求。研究成果可有效压缩发热隐患漏检率、降低过热故障复发频次,提升变电站精益化运维水平,为变电设备发热缺陷长效治理提供可落地的技术与管理方案。

关键词: 变电设备; 设备发热; 温升故障; 在线测温; 预测性运维

DOI: 10.64649/yh.shfzykjcx.issn3078-8994.202607025

0 引言

随着新能源大规模并网、工商业与居民用电负荷同步增长,迎峰度夏、迎峰度冬阶段变电站设备长期重载运行,设备散热负荷持续走高。依据电网运维故障统计,超过75%的变电设备非计划停运事故前期均伴随不同程度发热缺陷,其中母线接头、隔离开关触头、开关柜内部端子、主变冷却系统、高压电缆终端是发热故障高发点位。轻微过热会加速绝缘材料老化、绝缘油劣化;中长期持续超温将造成触头熔蚀、密封失效、内部放电,严重时引发开关柜起火、主变绕组烧毁、整条输电线路跳闸,对区域电网供电可靠性造成严重冲击。

当前国内针对变电设备发热的相关研究存在三点明显局限:第一,故障成因分析较为碎片化,大多仅分析单一接触不良或冷却不足问题,忽略高温、谐波、机械松动、积污凝露多因素叠加形成的复合发热故障;第二,管控手段偏向被动处置,重点研究红外测温硬件应用,缺少事前预判、分级管控、闭环溯源的整套管理机制;第三,治理对策通用性较强,未区分老旧常规变电站与新一代智能变电站、轻载站与重载枢纽变电站的差异化改造方案,落地适配性不足。

为解决上述行业痛点,本文结合基层变电运维现场多年实测数据与缺陷台账,系统归类各类发热故障表现形式,深度挖掘表层故障背后的底层诱因,构建兼具数字化监测、设备技改、调度优化、运维管控的一体化防控模式,实现变电设备发热隐患从“事后抢修”向“事

前预控、源头根治”转型,研究具备较强理论新颖性与现场实用价值。

1 变电站设备发热故障分类及运行危害

变电站各类电气设备结构原理、运行环境存在显著差异,发热缺陷产生路径不同,可划分为接触型损耗发热、电磁本体损耗发热、环境诱导散热失效发热、电网工况异常诱发发热四类,各类故障危害特征存在明显区分。

1.1 接触型损耗发热(最高发故障)

此类故障集中于设备可拆分连接部位,包含隔离开关动静触头、母线拼接接头、电缆接线端子、互感器引线、开关柜内母排搭接点。依据焦耳定律,导体接触电阻与发热量呈正相关,当接触面氧化、紧固力矩不足、铜铝直接搭接、接触面存有粉尘油污时,接触电阻大幅上升,负荷电流流经后持续积聚热量。

该类发热具有渐进式发展特征,初期温差较小,人工巡检极易遗漏;长期运行后局部温度持续抬升,触头表层烧蚀、出现氧化黑斑,最终造成接触面熔焊、断线、相间短路。密闭开关柜内部接头发热无法直观观察,高温引燃内部绝缘件极易引发柜内火灾,造成单段母线全部停运,供电损失范围大。

1.2 电磁本体损耗发热

主要产生于变压器、并联电抗器、电流电压互感器等电磁类设备,发热来源分为绕组铜损、铁芯磁滞损耗与涡流损耗。设备设计阶段已匹配冷却系统,正常工况下损耗热量可稳定

散出；一旦出现内部绕组老化短路、铁芯硅钢片松动、有载调压开关触头磨损、冷却风机/散热油管堵塞等问题，散热能力不足，热量持续堆积引发本体整体性温升超标。

变压器长期过热会加速绝缘油裂解，产生乙炔、氢气等故障特征气体，埋下内部放电、绕组击穿隐患；电抗器温升超标会出现外壳变形、绝缘漆脱落，严重时发生起火爆炸。

1.3 环境诱导散热失效发热

设备本体无结构性缺陷，由外部环境改变间接造成散热受阻、附加温升提升。夏季极端高温天气下，配电室、高压开关柜密闭空间通风量不足，环境基准温度上升，设备与空气换热温差缩小，同等损耗下温度显著升高；梅雨、沿海高湿区域设备瓷瓶、母排表面形成凝露，结合粉尘、金属粉末形成污秽层，增大泄漏电流，产生持续性附加发热；风沙、重工业厂区粉尘持续堆积，堵塞主变散热翅片、开关柜通风百叶，散热通道受阻；冬季低温冷缩会造成螺栓、触头配合间隙变大，间接增大接触电阻，诱发接触发热。

环境诱发发热具备明显季节性、群体性特征，高温多雨时段站内多台设备同步出现温升异常，集中增加运维处置压力。

1.4 电网工况异常诱发发热

由电网运行参数偏离额定标准带来的瞬时、持续性过热。用电高峰期设备长时间过载运行，回路电流超过额定值，电气损耗成倍增长，产热速率超出散热极限；系统三相负荷不平衡，单相回路长期过流发热；分布式光伏、储能大量并网带来谐波污染，谐波电流增大导体附加损耗、铁芯涡流损耗；电网频繁调峰、设备频繁分合闸产生冲击涌流，反复冲击触头接触面，加速氧化松动，间歇性出现温升骤升。

此类发热随负荷曲线动态变化，夜间低谷负荷下温度恢复正常，常规定点测温容易误判为无故障，隐患长期留存。

2 变电站设备发热多层级成因综合分析

摒弃单一故障点分析方式，从电气工艺、机械结构、外部环境、运维管理、电网调度五个维度梳理发热核心诱因，重点剖析多因素耦合升温机理。

2.1 电气安装与材质工艺缺陷(根源性内因)

设备投运前期施工不规范是长期发热隐患的源头。一是搭接面处理标准缺失，母线、端子拼接前未彻底打磨氧化层，接触面残留防锈油、金属碎屑，直接抬高接触电阻；二是紧固力矩管控不严，施工仅凭人工经验紧固螺栓，

未使用力矩扳手，紧固力过小造成接触面贴合不紧密，紧固力过大造成金属塑性变形，长期运行后出现松动；三是铜铝直接搭接未做过渡处理，铜、铝金属电极电位存在差值，潮湿环境下发生电化学腐蚀，接触面快速生成氧化绝缘层；四是导电辅助材料选用劣质产品，导电膏耐温性能不足，高温下快速干涸失效，失去降阻作用。

电能质量治理缺失会加剧设备整体发热，变电站未配套滤波装置，谐波长期作用下绕组、母线附加损耗持续升高，放大各类局部过热缺陷。

2.2 机械老化与振动松动(渐进式诱因)

高压开关、隔离开关常年分合闸操作，内部弹簧弹性衰减、传动连杆磨损、触头对位偏移，动静触头有效接触面积缩减，接触压力持续下降；设备运行过程中持续电磁振动，使母线、端子紧固螺栓缓慢松脱，原本合格的搭接点逐步转化为高阻发热点。

主变有载调压开关频繁切换负荷，电弧反复灼烧触头表面，形成凹凸烧蚀面，接触稳定性持续变差，不仅开关本体发热，热量传导至变压器油中，抬高整体油温。机械类缺陷发展周期较长，一般投运3~5年后集中显现，属于典型渐进式故障。

2.3 外部环境温湿度与污秽干扰(外部催化因素)

环境是放大发热缺陷的关键催化条件。环境温度每提升10℃，电气设备绝缘老化速度提升一倍，同时散热效率下降30%左右；高湿凝露使金属接触面加速腐蚀，泄漏电流同步上升；粉尘、化工腐蚀性气体附着在散热部件表面，堵塞散热通道，形成保温层，热量无法向外扩散。

部分户外隔离开关未加装防雨防尘防护罩，雨雪直接浸泡触头部位，腐蚀速度大幅加快，每年雨季过后站内接触发热缺陷数量明显上升。

3 设备发热创新型五位一体综合防控对策

针对多因素耦合发热机理，创新构建“智能态势监测、差异化设备技改、动态负荷调控、分级风险管控、全周期闭环运维”一体化防控体系，从预判、治理、调度、管理、长效保障全链条解决发热缺陷。

3.1 多参量智能态势感知监测体系(创新预判手段)

突破传统单一温度阈值报警模式，搭建负荷、环境、温度耦合研判在线监测系统，实现隐性发热提前预警。

一是分层布设测温传感设备：在母线接头、

隔离开关触头、电缆终端部署无源无线温度传感器,主变绕组、铁芯采用光纤光栅测温,开关柜内部加装温湿度一体化采集终端,实现24小时不间断全覆盖数据采集,消除人工巡检盲区;

二是建立双维度预警模型:除固定温度阈值报警外,新增温升速率预警,对比同设备历史同期温度、同环境基准温度、实时负荷电流,当1小时温升超过8K自动触发预警,精准识别早期轻微发热隐患,解决常规测温只能发现重度过热的短板;

三是智能平台耦合研判:后台系统同步接入负荷曲线、环境温湿度、谐波监测数据,自动区分“负荷短时升温”“环境高温升温”“设备故障过热”三类温升,减少无效告警,提升隐患识别精准度;

四是优化红外测温辅助机制:推行“日常普测、高温重载加密测、夜间高峰专项测”三维测温制度,每年6—9月高温时段、负荷高峰期增加夜间测温作业,弥补在线监测设备检修空档。

3.2 分设备差异化源头技改方案(根治结构性缺陷)

按照发热故障类型、设备新旧程度制定针对性改造措施,从硬件层面消除发热根源。

接触类发热改造:全面更换铜铝直接搭接点位,加装标准铜铝过渡排;所有接头打磨后涂抹耐高温长效导电膏,采用力矩扳手标准化紧固,加装弹簧防松垫圈;烧蚀触头、端子全部更换为银合金高导电耐温配件,户外设备加装防雨防尘密封护罩。

散热失效改造:密闭开关柜加装温湿度联动智能风机,高温自动启动、低温自动关停;

主变清理堵塞散热管路,老化风冷系统更换大功率风机,老旧油浸主变按需增设辅助水冷装置;粉尘污染区域设备加装防尘网罩,建立季度深度清污制度。

电磁本体发热改造:运行超10年损耗超标、绝缘老化的变压器、互感器分批更换;定期开展油色谱、绕组直流电阻测试,提前预判内部铁芯、绕组损耗隐患;站内加装有源电力滤波器,治理谐波带来的附加温升。

4 结论与展望

变电站设备发热属于电气工艺、机械老化、外部环境、运维管理、电网工况多因素耦合形成的复合型故障,传统单一测温、事后消缺的管控模式难以适配新型电力系统重载运行需求。本文系统划分四类典型发热故障并明确各自危害,从五层维度深挖故障底层诱因,创新搭建包含智能态势监测、差异化技改、负荷动态调控、分级风险管控、全周期运维的五位一体防控体系,引入温升速率预警、四色风险分级、多参量耦合研判等新颖管控手段,兼顾老旧站低成本改造与智能站数字化升级。

整套对策落地后可大幅降低发热隐患漏检率,减少设备过热故障复发频次,避免因过热引发的停电、火灾事故,提升变电站供电稳定性与运维精益化水平。

未来随着人工智能、大数据预测技术深度融入电网运维,可进一步构建基于气象、负荷、设备年限、历史缺陷数据的AI发热预测模型,实现中长期温升故障预判,推动变电运维全面转向预测性维护,从源头持续降低设备过热缺陷发生率,为新型电力系统安全稳定运行提供坚实保障。

参考文献:

- [1] 刘广州,刘博嘉,陆朝阳,等.变电站预制舱凝露问题分析与研究[J].电力安全技术,2025,27(7):58-60.
- [2] 刘果培.具有接地电流抑制功能的断路器跳闸控制回路[J].电工电气,2025,(11):71-76.
- [3] 丁绍旭.电力变压器绝缘和油含水量控制工艺及措施(1)[J].变压器,2025,62(4):62-64. DOI:10.19487/j.cnki.1001-8425.2025.04.011.
- [4] 魏玉丹.输电线路智能化运行维护技术的探究[J].电力设备管理,2026,(3):50-52. DOI:10.26977/j.cnki.dlsbgl.2026.03.006.
- [5] 郑会奇.浅谈多脉波制氢整流变压器的拓扑原理和结构设计[J].变压器,2025,62(11):6-12. DOI:10.19487/j.cnki.1001-8425.2025.11.010.

作者简介:张红超(1987.06—),男,汉族,河北保定人,本科学历,中级工程师,研究方向:变电站运行与维护。