

Cause analysis and prevention measures for overheating defects in substation equipment

Feiya Ma¹ Jia Ma² Liming Ding² Zongtian Zhang²

1. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd. Bazhou Power Supply Company, Korla, Xinjiang, 841000, China

2. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd. Changji Power Supply Company, Changji, Xinjiang, 831100, China

Abstract

As the core node for power conversion, distribution, and regulation in the power system, the stable operation state of substation equipment is directly related to the safety and reliable power supply of the power grid. Equipment overheating is one of the most common and highly hazardous defects in the long-term operation of substations. It not only accelerates the aging of equipment insulation and causes performance degradation, but may even trigger serious accidents such as fires and explosions, leading to large-scale power outages and huge economic losses. This paper aims to conduct an in-depth analysis of the internal mechanisms and external incentives of overheating defects in substation equipment, systematically explore the causes from multiple dimensions including equipment design, material properties, operating conditions, environmental factors, and maintenance management. On this basis, a comprehensive and hierarchical prevention and control strategy integrating technology upgrading, condition monitoring, operation and maintenance optimization, and management enhancement is proposed, in order to provide a theoretical basis and practical reference for improving the operational reliability of substation equipment and ensuring the safe and stable operation of the power grid.

Keywords

Substation equipment; Overheating defects; Cause analysis; Prevention and control countermeasures

变电站设备过热缺陷成因分析及防控对策

马菲雅¹ 马佳² 丁立明² 张宗田²

1. 国网新疆电力有限公司巴州供电公司, 中国·新疆 库尔勒 841000

2. 国网新疆电力有限公司昌吉供电公司, 中国·新疆 昌吉 831100

摘要

变电站作为电力系统电能转换、分配和调控的中心点, 变电站设备的运行稳定性直接影响着电网的安全与可靠供电。设备过热是变电站运行过程中最为常见的严重缺陷之一, 长期存在的设备过热会加速设备绝缘的老化, 引起设备性能的恶化, 甚至会引起火灾、爆炸等事故的发生, 造成大范围停电和巨大的经济损失。针对以上问题, 本文结合变电站设备过热缺陷内部机制以及外部原因, 分别从设备设计、设备材料、运行工况、周围环境以及运维管理水平等方面分析了变电站设备过热缺陷形成的原因, 最后结合上述因素, 给出基于技术改造、状态检测、运维改善、加强管理四个方面的综合分层防控策略, 用以保证变电站设备正常稳定运行以及电网的安全稳定运行。

关键词

变电站设备; 过热缺陷; 成因分析; 防控对策

1 引言

伴随着经济社会的快速发展, 电力的需求量也越来越大, 电网的负荷也在不断地加大, 变电站内的设备运行压力越来越重。过热缺陷作为反映设备不良状态的重要标志, 所占比例和危害性也是有增无减。所谓设备过热指的是设备某一部分或者全部部位超过自身的限值及规范规定的最高工作温度或者与其他同期正常工作的相同性质的电气设备相

比, 温差明显偏高的情况。而当导电回路电阻过大, 介质损耗增大, 涡流损耗异常增多后, 同样会导致设备产生过热现象, 若不进行及时地处理便会进入一个负反馈循环的状态, 甚至会导致设备出现不可修复的问题。所以在对变电站的运行设备过热缺陷开展相关分析之后要严格制定相应的防范措施, 从根源上杜绝此类问题的发生。这就要求我们针对变电站设备过热缺陷的成因体系进行深入分析, 逐步建立和完善过热缺陷防控体系, 预防和制止过热缺陷发生, 争取做到过热缺陷早期预警和主动性防控, 为过热缺陷防控提供方法支撑和技术保障。

【作者简介】马菲雅(1999-), 女, 回族, 中国新疆昌吉人, 本科, 助理工程师, 从事变电检修研究。

2 变电站设备过热缺陷的深层成因分析

2.1 连接部位接触电阻增大导致的发热

开关柜、隔离开关、母线连接点、电缆终端头是变电站设备中常发生过热的部位。原因是多方面的，除了设备本身质量和使用维护的问题外，以设计制造方面的原因为主，主要包括以下几个方面：连接结构设计不合理、加工精度不够、表面粗糙度过高、接头初始接触电阻偏大；材质选型上不当，选用易氧化或者硬度过大的金属材料；安装检修工艺不良，具体表现为安装紧固力矩不够或者过大造成接触件变形，连接螺栓没有按照规定紧固力矩紧固，接触表面不够清洁，有氧化层、灰尘、油污等杂物未清除，使用的导电膏不合格或者是未使用导致设备在长期运行过程中发生劣化^[1]。一方面由于电动力、热应力的作用下，连接件时间长可能会出现松动。另一方面接触面随着时间的增长，在大气中发生氧化、硫化现象而产生高电阻率的化合物膜。长期通过负荷电流，特别是经过短路电流的冲击后，接触点会出现局部熔焊后又再次形成的情况，这样会使接触更加不良。

2.2 设备本体损耗异常导致的发热

这是通过设备进行电磁转换过程中出现的或者是非正常工作状态下产生的功率损耗引起的发热现象。如变压器类的设备主要是指绕组电阻损耗和铁芯的磁滞损耗以及涡流损耗；绕组出现匝间或者层间短路等绝缘故障会使局部的电阻损耗成倍的增大；硅钢片之间的绝缘破坏导致硅钢片之间发生短路后会造成涡流损耗显著增加；设计不合理或者制造质量不良，会造成空载损耗较大；冷却装置故障或散热器管路堵塞，散热能力差造成温度过高。断路器类设备：一是导电回路接触电阻增大；二是灭弧室的灭弧能力变差，在灭弧过程中由于电流太大，灭弧时间太长造成电弧能量过大发热；三是 SF₆ 气室内的 SF₆ 气体压力下降导致内部绝缘降低及灭弧能力下降，可能会出现内部放电发热的现象。此外还有互感器、电抗器等设备：当介质受潮或老化后使介质的损耗角正切值增大就会产生介质损耗发热。如果存在内部放电、局部放电都会产生大量的热量。在电抗器的工作过程中如受到谐波电流的作用，会使其出现涡流损耗和环流损耗变大，也会导致温度上升。

2.3 负荷及系统运行条件的影响

过负荷运行：设备连续超出铭牌的容量工作时间长，运行电流密度大，电阻损耗大大增加，从而引起整体温升加快。谐波污染：非线性负载向电网注入谐波电流，在变压器绕组上产生额外的涡流损耗和杂散损耗；同时在变压器铁芯中产生的谐波磁通也会带来额外的铁损。对于中性点接地的系统，三次谐波电流易形成环流而加重发热。谐波使集肤效应、临近效应加剧，引起有效的电阻增大。电压波动与不对称：系统电压过高导致铁芯饱和，励磁电流增大，铁损增大；三相负荷严重不对称时，会使变压器某侧绕组电流增大而发生过热。

2.4 环境与外部因素

环境温度过高：变电站所处环境空气流通较差、空间较小或夏天气候炎热，设备散热环境较差，容易造成设备正常运行时散热不足出现过热现象。例如污秽和潮湿，比如：设备外绝缘表面积污十分严重，在潮湿环境下污秽层的导电能力增加，造成表面泄漏电流加大，引起部分发热，并逐步发展成为污闪；另外，由于潮湿导致金属的腐蚀、氧化加快。此外，机械振动及外力冲击，邻近的设备运行产生振动或者地震等其他因素造成设备连接部位松弛，导致过电压引起火花放电故障、或因小动物进入发生短路事故。

2.5 状态监测与运维管理不到位

检测手段落后与巡检盲区：采用传统的依赖于周期性巡查、使用手持式测温仪的方式很难及时发现设备内部以及发展速度较快的隐患。巡检周期较长，则无法实现及时监控。如：开关柜内小气室、开关柜母排及母排紧固件等地方就存在着检测“重抢修、轻维护”。预防性试验针对性较差：例行试验项目不能够及时发现设备状态缓慢劣化趋势，或者对于试验数据的分析深度不够，不能有效预警可能发生过热的情况^[2]。维护偏差：“重抢修、轻维护”的思想仍然存在，没有严格按照设备周期性紧固、清洁、防腐等工作开展基础性维护工作；甚至缺少规范的基础性维护作业标准和方案。技术监督、管理体系不够健全，对设备全寿命周期过程的技术档案、缺陷记录、家族性缺陷分析等管理不全，未充分应用历史数据辅助运维决策。

3 变电站设备过热缺陷的综合性防控对策

3.1 源头控制与精益化运维

优化设备选型与设计：重视设备采购选型，应先优选结构合理、技术成熟、可靠度高的产品，并选择有较好运行业绩的设备；对重要的连接部位必须采用镀银或搪锡的防腐措施，保证足够的接触压力、接触面积；对一些重要的变电站，可考虑采用更多能适应全工况的设备。严把安装、验收关，制定标准化的安装作业指导书，对导体连接这一道最重要的工序，要做出严格的清洁、紧固力矩、涂抹导电膏等工艺要求，并使用扭矩扳手、打上记号等手段确保紧固可靠。要严格验收，除进行一般检验项目外，必要时还要进行回路电阻测试等项目的检验。要加强常态化的巡视与维护，要完善一套规范的巡视维护制度，通过眼睛看、耳朵听、鼻子闻，多方位对各个节点设备进行巡视维护。对重要的连接点要制定定期的维护计划，每次停电机会都要对相关设备进行停电检查、紧固、清洁和防腐工作。要加强对设备冷却系统的维护，防止其堵塞而使发热量不能及时散出去。

3.2 深化状态监测与智能诊断技术应用

推广应用在线测温技术：充分利用光纤光栅测温、无线测温传感器等在线监测手段对开关柜触头、电缆接头、变压器套管引线等发热点进行实时、不间断的测温，测温结果

接入变电站综合自动化系统并设置多个预警阈值；严格开展红外测温诊断：将红外热像检测纳入定期巡检的重要内容，编制检测计划，检测所有重点设备和连接点，在负荷≥30%的状态下开展检测工作，综合考虑环境温度、风速、辐射等因素的影响；按照DL/T 664等标准严格依据热像图进行分析诊断，应用相对温差法、同类比较法等方法判断缺陷性质；

构建状态评估和预测预警平台，综合应用在线测温、红外检测、油色谱分析、局部放电等各种状态监测数据以及设备运行负荷、环境因素等数据，建立设备健康状态评估模型和故障预测模型，通过趋势预警和提前预控的方式，实现过热风险的趋势预警和早期干预，改变传统的“定期检修”的方式进行“预测性维护”。

表 1 变电站主要设备过热缺陷成因及特征分析

设备类型	主要过热部位	核心成因	过热特征与后果
变压器	绕组、铁芯、引线连接处、套管将军帽	绕组匝间短路、铁芯多点接地、接触不良、冷却系统故障、过负荷、谐波	油温/绕组温度普遍或局部异常升高，油中特征气体(如CH ₄ , C ₂ H ₂ , H ₂)含量增长，绝缘纸聚合度下降，严重时引发绝缘击穿。
高压开关柜	断路器触头、隔离开关触头、母线连接排、电缆接头	接触面氧化/腐蚀、紧固件松动、触头烧损、安装工艺不良	局部温度显著高于其他相或正常值，柜体表面温升异常，可能伴有放电声，易引发相间短路或绝缘故障。
隔离开关	刀口接触部位、转动轴销	接触压力不足、刀口氧化烧蚀、机构卡涩导致合闸不到位	操作后或负荷电流下局部发热严重，热成像显示刀口温度异常，长期可导致金属退火、机械强度下降。
电流互感器	二次端子、内部连接点、器身	二次回路开路、内部绝缘受潮、介损增大	二次端子处灼热，有异响、冒烟，内部过热导致绝缘油分解或环氧树脂开裂，精度下降甚至爆炸。
电力电缆	终端头、中间接头、本体	制作工艺不良、机械损伤、长期过载	接头处温度呈热点分布，绝缘层热老化加速，可能发展为树枝状放电，最终导致击穿。

3.3 优化运行方式与改善外部环境

科学调度，避免过载：电力调度部门要加强对变电站负荷的监视，根据负荷变化适时调整运行方式，尽可能避免设备长期过负荷运行，对于负荷波动较大的区域设备应留有一定的裕度。对于无功功率消耗较大的用户应尽快实施谐波治理措施，可采取在谐波源用户侧或变电站内安装无源/有源滤波器来抑制谐波电流进入系统，消除由谐波产生的附加损耗发热问题；二是改善设备运行环境。加大变电站站容站貌整治力度，及时清理设备外绝缘积污，防止污闪发生；户内站须保证通风系统正常工作，并考虑增设柜内设备强制通风装置；三是做好防小动物封堵工作^[3]。

3.4 强化技术监督与管理建设

完善缺陷管理制度：完善设备过热缺陷档案，包括发现过程、缺陷分析、缺陷处理和缺陷验证的过程，还要开展家族性缺陷分析，找出同型号、同批次设备的问题；开展人员培训和能力建设，定期对运维人员开展专业技能培训，掌握红外测温、在线监测系统的应用方法、缺陷诊断分析方法，提升发现和处置过热缺陷的能力；实施全寿命周期管理，对设备实现全寿命周期的过热防控，从设备的选型、安装到运行、检修、报废都贯穿了过热防控的理念，并通过基于可靠性分析建立设备的寿命评价和更换策略。

4 结语

变电站设备过热缺陷是造成设备损坏的主要原因之一，由设计、材料、工艺、运行、环境、管理等多种因素导致，从深层次来说，设备过热缺陷问题是一个复杂的问题，防控也是一项系统工程，要想真正消除设备过热缺陷，就必须从根源抓起，把好设备入网关、安装质量关；核心技术要推进运检深度融合，充分应用现代传感、数据分析以及智能诊断技术，实现设备可测、可控、可维护，从业后的检修到事前的预警及预测性维修；完善科学的运行调遣、优质环境保障、精益化管理工作，才能形成一套真正有效的综合防控体系，切实降低甚至杜绝变电站设备过热缺陷现象的发生和发展，提高变电站设备的健康水平和电网供电可靠性，为打造坚强智能电网保驾护航。在物联网、数字孪生和人工智能技术发展的助力下，变电站设备的状态感知能力、故障预控能力将会得到进一步提升，为过热缺陷精准防控提供更大的技术依据。

参考文献

- [1] 陈军,徐敏杰.变电站机电设备常见故障分析及维护策略[J].电站辅机,2025,46(03):95-98.
- [2] 曹阳,陈博浩.变电站设备状态监测与故障诊断技术研究[J].中国设备工程,2025,(16):192-194.
- [3] 茹作伟,徐明.变电站运维过程中的故障早期诊断技术探讨[J].产品可靠性报告,2025,(08):106-107.