工业用电环境中的电气安全隐患识别与管控策略

顾保华

国网新疆电力有限公司和田供电公司和田市供电分公司　新疆　和田　848000

摘　要：工业用电环境复杂恶劣，电气安全隐患隐蔽性强、连锁风险高，是引发火灾、触电及设备损毁的主要诱因。本文从系统安全视角出发，构建了涵盖设备状态、作业行为、环境因素及管理体系的四维隐患识别模型，系统分析了过载、短路、接地故障、谐波污染、绝缘老化等典型隐患的成因与表征。基于风险分级管控原则，提出了技术防控、作业规范、智能监测及应急管理四位一体的综合管控策略。研究表明，建立动态隐患清单并实施差异化管控措施，可有效降低电气事故发生概率，为工业企业电气安全管理提供系统化解决方案。

关键词：工业用电；电气安全；隐患识别；风险管控；智能监测

引言：工业企业用电设备种类繁多、负荷波动大、运行环境恶劣，电气系统长期处于高温、粉尘、潮湿、腐蚀等多重应力叠加状态。传统安全管理过度依赖事后处置，缺乏对潜在隐患的主动识别与预控能力。短路、接地失效、绝缘破损等隐患若不能及时发现，极易演变为电弧烧伤、触电伤亡或电气火灾等恶性事故。如何建立系统化的隐患识别方法并配套分级管控策略，已成为工业企业电气安全管理亟待突破的核心问题。

1 工业用电环境的特殊性与安全挑战

1.1 工业用电环境的基本特征

工业用电环境与民用、商业用电存在显著差异，体现在负荷特性、运行工况及空间条件三方面。负荷特性方面，工业现场配置大功率电动机、变频装置等冲击性非线性负载，启动电流可达额定值 5 至 7 倍，频繁启停造成电压波动和谐波污染。运行工况方面，钢铁、化工等行业连续生产，电气设备 24 小时不间断运行，热积累加速绝缘老化。空间条件方面，配电室、车间等区域普遍存在高温（超 40℃）、高湿（85%以上）、导电粉尘及腐蚀性气体，严重削弱电气设备绝缘性能和防护等级。

1.2 工业电气安全事故的典型特征

工业电气安全事故具有隐蔽性、突发性、连锁性三大特征。隐蔽性表现为隐患难以通过常规巡检发现，如电缆局部放电、绝缘缓慢老化等，无明显外部表征却持续积累能量。突发性体现为从隐患暴露到事故爆发时间极短，绝缘击穿可在毫秒级完成。连锁性最为突出，单一设备故障可通过电网快速传导，引发相邻设备过载、越级跳闸，甚至局部电网崩溃。

1.3 工业电气安全管理的难点分析

当前工业电气安全管理面临三大核心难点。第一，隐患识别手段单一，大量企业依赖人工巡检和年度预防性试验，无法捕捉早期隐患信号，带电检测技术普及率不足 30%。第二，风险评价标准模糊，现有规程缺乏量化分级依据，同类隐患在不同工况下风险等级差异大，管理人员难以判断处置优先级。第三，管控措施落地困难，部分企业制度与实际操作脱节，临时用电、检维修等高风险场景管控流于形式。三重难点相互交织，导致隐患“识别不出、判断不准、管控不住”的被动局面[1]。

2 电气安全隐患四维识别模型

2.1 设备状态隐患识别

设备状态隐患包括过载、绝缘劣化、接触不良及保护装置失效四大类。过载隐患表现为电流持续超过额定值 1.1 倍以上且温升速率异常，可通过监测负荷曲线识别。绝缘劣化涵盖电缆老化、绕组受潮等，识别手段包括绝缘电阻测试（低于 1MΩ/kV 为警戒值）、介质损耗因数测量（tanδ 超 0.01）、局部放电检测（放电量大于 100pC）。接触不良集中在连接端子、开关触头等部位，红外热像检测温差超 15℃或绝对温度超 90℃即异常。保护装置失效包括断路器卡涩、热继电器漂移、剩余电流保护器拒动等，需通过定期传动试验验证可靠性。

2.2 作业行为隐患识别

作业行为隐患涵盖操作类违章、检修类违规及应急类失误。操作类违章包括带负荷拉合隔离开关、误入带电间隔、未验电挂接地线等，约 52%误操作发生在交接班和夜间检修期间。检修类违规表现为不办理工作票、安全措施未落实即开工、工具遗留设备内等，需通过现场监护、过程录像及完工验收管控。应急类失误集中在

故障处理时跳过正常程序、误判故障范围，造成事故扩大。建立标准化应急操作卡片和模拟演练机制，是识别和纠正此类隐患的有效手段。

2.3 环境因素隐患识别

环境因素隐患由工业场所特殊环境引发。高温环境加速绝缘老化，温度每升 10℃绝缘寿命缩短约 50%，应重点关注超 40℃区域设备。潮湿与凝露环境易形成水膜降低爬电距离，通过测量相对湿度（超 85%预警）、检查电缆沟积水和柜内凝露识别。导电粉尘环境沉积在绝缘子表面形成导电通路，需定期测量表面电阻（低于 10MΩ 报警）。腐蚀性气体环境造成金属锈蚀，可通过铜排变色程度、螺栓扭矩衰减量化评估。多因素耦合环境应采用加权评分法确定隐患等级[2]。

2.4 管理体系隐患识别

管理体系隐患是前三类隐患的根源性因素。制度层面包括安全责任制不清、规程更新滞后、隐患排查周期不合理。执行层面表现为巡检记录造假、整改闭环率低、培训走过场。资源配置层面体现在专业人员不足（电工与设备比低于 1:50）、检测仪器缺失、维护预算压缩。识别方法包括制度评审、流程审计、员工访谈及事故回溯分析。该维度隐患治理需从组织架构、资源配置、考核机制等顶层设计入手，属于系统性改进范畴。

3 电气安全隐患分级与风险评估

3.1 隐患分级原则与方法

电气安全隐患分级遵循风险优先原则，综合考量发生概率和后果严重程度。发生概率取决于隐患类型、设备服役年限、历史故障频率及环境严酷程度。后果严重程度评估涵盖人员伤亡可能性、设备损坏程度、生产影响范围及环境破坏影响。采用风险矩阵法将隐患划分为四级：一级隐患（重大风险）为概率高且后果严重，如开关柜局部放电持续增长；二级隐患（较大风险）为概率中等但后果严重，或概率高但后果有限；三级隐患（一般风险）为概率和后果均中等；四级隐患（低风险）为概率低且后果轻微。分级结果作为制定管控措施优先级和资源配置的依据。

3.2 典型隐患的风险评估

各类典型隐患的风险等级存在显著差异。绝缘击穿类隐患（电缆终端老化、电机绕组受潮）发生概率随服役年限呈指数增长，投运 10 年以上的电缆每年绝缘故障率约为 2.5%，且击穿瞬间可产生电弧，造成人员烧伤和设备报废，综合评定为二级及以上风险。接地故障类隐患（接地线锈断、接地电阻超标）在 TN 系统中可能导致设备外壳带危险电压，触电致死概率高达 30%，其隐蔽性强、检测困难，应评定为一级风险。过载类隐患的发生概率与负荷管理直接相关，临时性过载风险较低，长期过载使绝缘寿命呈指数下降，需根据过载持续时间和幅度进行动态评估。谐波污染类隐患的风险具有累积效应，总谐波畸变率超过 8%时，电容器组过热爆炸的概率显著上升，评定为三级至二级风险[3]。接触不良类隐患初期风险较低，但温升呈现正反馈特性（温度升高导致接触面氧化加剧，进一步推高温升），一经发现即应升级为二级风险处置。

3.3 隐患动态评估与预警机制

静态分级无法反映隐患的动态演变特性，需建立基于在线监测数据的动态评估与预警机制。预警机制采用三级递进架构：蓝色预警（关注级）对应隐患参数达到注意值，设备可继续运行但需增加巡检频次；黄色预警（警告级）对应隐患参数达到警戒值，应在 72 小时内安排停电检修；红色预警（危险级）对应隐患参数达到动作值，需立即停止设备运行并组织抢修。动态评估的核心技术包括：趋势分析法对比同一测点历史数据，当参数变化率连续三次递增时触发预警；横向比较法对比同一回路同类设备参数，偏差超过 30%时提示异常；关联分析法结合负荷、环境温度等参数对隐患阈值进行修正。预警信息应通过声光报警、短信推送、系统弹窗等方式实时触达运维人员，并与生产管理系统联动，自动生成隐患处置工单。

4 电气安全隐患综合管控策略

4.1 技术防控策略

技术防控是消除电气安全隐患的根本手段，应从设计优化、设备选型、保护配置及智能监测四个层面系统实施。设计优化层面，新建或改造项目应采用冗余设计理念，重要负荷设置双回路供电，电缆通道实施防火分隔，配电室按照高于环境条件一级的防护等级配置（如 IP54 以上）。设备选型层面，针对腐蚀性环境选用三防型（防潮、防霉、防盐雾）电气设备，冲击性负荷回路选用强化型触头断路器，谐波严重区域配置滤波装置或选用 K 系数变压器。保护配置层面，除常规过载、短路保护外，应加装剩余电流动作保护器作为接地故障的后备保护，电动机回路配置热敏电阻保护监测绕组温度。智能监测层面，部署电气火灾监控系统（监测剩余电流和温度）、电缆绝缘在线监测装置（监测接地电流和介质损耗）、开关柜局部放电在线监测系统（超声波或地电波法）。技术防控措施应形成“预防—监测—预警—隔离”的完整链条，将隐患消除在萌芽状态。

4.2 作业规范管理

作业规范管理聚焦于减少人的不安全行为，涵盖作业许可、标准化操作及能力认证三大支柱。作业许可制度方面，所有电气作业实行分级审批，高压作业、带电作业、有限空间作业必须办理专项工作票，明确作业范围、安全措施及监护人。临时用电作业审批时限不得超过 15 天，超期需重新办理。标准化操作方面，建立岗位标准作业程序（SOP），将操作步骤分解为“检查—确认—操作—复核”四个环节，关键操作采用唱票复诵制。停送电操作严格执行“停电、验电、挂地线、挂牌、上锁”五步骤，并使用色标管理区分运行、备用、检修状态。能力认证方面，电气作业人员实行资质与实操双认证，每两年进行一次复审考核，考核内容包括故障模拟处置、应急操作及安全规程。建立违章积分管理制度，累计达到 12 分者暂停作业资格并重新培训[4]。

4.3 智能监测预警系统

智能监测预警系统是实现从周期性维护向状态检修转变的关键工具。系统架构分为感知层、网络层、平台层和应用层四个层级。感知层部署各类传感器，包括无线测温终端（监测电缆接头、母线温度）、剩余电流互感器（监测接地漏电流）、谐波分析模块（监测电能质量参数）、振动传感器（监测开关柜机械状态）。网络层采用工业以太网或无线物联网（NB-IoT、LoRa）实现数据汇聚传输。平台层搭建电气安全数据中台，集成设备台账、历史数据、实时监测值及预警模型，具备数据清洗、特征提取、趋势分析功能。应用层面向不同用户角色提供驾驶舱视图（管理层关注全局指标）、监测看板（运维人员关注实时数据）、分析报表（工程师关注趋势规律）。系统核心价值在于将离散的监测数据转化为可执行的运维决策，如自动生成巡检任务单、推送检修建议、输出设备健康度评分。

4.4 应急响应与事故处置

应急响应是隐患管控的最后一道防线，其有效性取决于预案科学性、演练真实性和物资完备性。应急预案应针对电气火灾、触电事故、大面积停电三类典型事件分别编制，明确应急组织架构（总指挥、现场指挥、技术支援、医疗救护）、响应分级标准（车间级、厂级、社会联动级）及处置流程（汇报、隔离、疏散、灭火、急救）。应急演练每半年开展一次全要素实战演练，包括故障模拟、紧急停电、伤员转运及火灾扑救等环节，演练后应进行评估改进。应急物资方面，配电室应按标准配置绝缘工具（绝缘手套、绝缘靴、验电器）、应急照明（防爆型手电筒）、消防器材（二氧化碳灭火器、灭火毯）及急救用品（急救箱、心肺复苏模型）。绝缘工具应每半年送检一次，灭火器每月检查压力值。事故处置遵循“先断电、后处置”原则，触电急救实施“脱离电源—判断意识—心肺复苏”三步流程，电气火灾在断电前严禁用水或泡沫灭火。

结束语

工业用电环境中的电气安全隐患具有隐蔽性强、连锁风险高的特征，传统管理模式难以满足本质安全要求。本文构建了设备状态、作业行为、环境因素、管理体系四维识别模型，实现了隐患的系统化排查与分类。基于风险评估矩阵，将隐患划分为四级并配套差异化的管控优先级，解决了资源配置与风险等级不匹配的问题。技术防控、作业规范、智能监测、应急响应四位一体的综合策略，形成了覆盖隐患全生命周期的闭环管控体系。工业企业应立足自身实际，建立动态隐患清单，推进智能监测技术应用，持续优化管理流程，将电气安全从“事后处理”转向“事前预防”，从根本上降低电气事故风险。

参考文献

[1] 汤晓宇, 杨静, 朱来花. 低压电气装置保护接地系统的研究 [J]. 电力系统装备,2021(15):88-89.

[2] 徐瑞. 工业电气安全风险评估与防控措施 [J]. 广东安全生产技术，2025(6)：124-126.

[3] 廖砚雄. 基于物联网的电气设备状态在线监测系统设计 [J]. 消费电子，2025(19)：275-277.

[4] 黄绍兰, 徐景轶. 化工企业电气工程质量控制与安全管理策略 [J]. 化工管理,2024(23):111-113.