能源行业电气自动化设备故障监测与管理研究

王 毅，赵佳丽，刘晟钰

（中国能源建设集团东北电力第二工程有限公司，辽宁 大连 116023）

摘 要 能源行业电气自动化设备担负着生产控制、安全防护、智能运维的重要工作，其运行可靠性关系到能源供应的连续性和安全性。本文就电气回路、机械设备、自动化系统和通信网络等常见故障提出融合在线监测、预测性维护、冗余容错和全生命周期管理的综合策略。创建多参数状态感知体系、故障树诊断模型以及冗余备份机制，实现由被动抢修向主动预防的运维模式转变。结果表明，该体系可以明显地减少非计划停机的风险，延长设备的使用寿命，提高能源生产系统整体的可靠性以及运维效率。

关键词 能源行业；电气自动化设备；故障监测；设备管理

中图分类号：TM76 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.28.024

0 引言

随着新型电力系统建设持续推进、能源结构转型步伐不断加快，电气自动化设备在火电、风电、光伏、煤矿等能源核心场景的应用覆盖度持续提升，设备保有量与系统集成复杂度也同步显著增长。传统定期计划检修模式难以精准识别早期隐性故障与突发失效风险，由此引发的非计划停机，带来的经济损失与安全运行隐患正持续扩大。当前，多源传感融合、数据驱动故障诊断、全链路智能运维等技术已逐步成熟落地，为能源领域设备全生命周期状态管控提供了全新的技术实现路径。在此行业背景下，系统开展能源行业典型自动化设备的故障特征规律研究，探索构建全维度状态监测体系、迭代优化运维管理机制，对保障能源基础设施长期安全、稳定运行，具备极高的工程落地应用价值。

1 能源行业电气自动化设备的关键作用

1.1 保障能源生产精准运转

电气自动化设备是能源生产流程的精准控制中枢，在火电、水电、风电、光伏等各种能源场景里，从燃料输送、锅炉燃烧、汽轮机运转到发电机并网发电，整个生产过程环环相扣，对时序和精度要求很高。电气自动化设备利用PLC控制器、DCS分布式控制系统以及各种智能执行机构，接收传感器传来的温度、压力、流量、转速等参数，经由逻辑运算之后驱动阀门、变频器、断路器等终端设备做出毫秒级的反应。闭环控制能力保证能源转换过程一直处在设计工况之内，防止人工操作迟缓造成的参数波动。所以，电气自动化设备担负着把物理能源变成稳定电能的主要调度任务，是能源生产系统正常运转的“指挥大脑”。

1.2 构筑能源系统主动防护

电气自动化设备是能源系统安全运行的主动防护屏障，能源行业高压开关柜、变压器、发电机组等关键设备长期处于高温、高湿、强电磁干扰的恶劣环境中，电气绝缘老化、接触不良、过载发热等隐患随时都有可能引起重大事故。自动化监测设备可以实时采集电流、电压、局部放电、温度、振动等各方面的状态量，在故障萌芽期就能发现异常趋势并发出预警，联动继电保护装置在毫秒级内完成故障隔离。与传统的手工巡检只能发现明显的缺陷不同，自动化设备可以对隐性的劣化过程进行持续的感知，从而把事后抢修变成事前预防。尤其在煤矿、海上风电等高危或者偏远的场所，自动化保护系统可以在人员不能及时到达的时候自行执行安全措施，避免事故扩大[1]。

1.3 驱动能源企业降本增效

电气自动化设备是能源企业降本增效、智能运维的重要抓手，能源行业设备资产数量多、种类繁杂，传统的定期检修方式存在着过度维修、漏检并存的问题，既造成人力物力的浪费，又不能避免非计划停机造成的巨大损失。自动化设备依靠自身的自诊断系统以及对外的数据接口，把自身的健康状况及时地传送到运维管理平台当中，促使检修工作由定期的维修转变为状态检修以及预测性维护。运维人员可以根据设备实际劣化趋势而不是固定的周期来安排检修，准确地匹配出所需的备件库存和人力资源，从而延长设备

作者简介：王毅（1986-），男，本科，高级工程师，研究方向：电力工程技术。

的使用寿命并且降低运维成本。自动化设备所产生出来的大量运行数据，给能源企业的能效分析、故障溯源、寿命预测等提供基础支撑，促使能源企业由经验管理转向数据管理。新型电力系统背景之下，由于风光等新能源出力具有随机、波动的特性，因此对电气自动化设备快速调节能力的要求也越来越高，成为保证电网频率稳定、电能质量的技术手段。

2 能源行业电气自动化设备常见故障

2.1 电气回路故障

电气回路故障是能源行业自动化设备最基础也最高频的故障类型，主要是短路、接地、过流、绝缘劣化、接触不良等。高压开关柜、变压器、变频器、电缆网络等长期受到大电流冲击和电压应力的双重影响，由于导体连接处存在热胀冷缩反复的作用，使得螺栓松动、接触电阻增大，从而引起局部过热，形成恶性循环，最终导致熔焊或者起火。绝缘介质老化的因素有温度、湿度、粉尘、腐蚀性气体等，在沿海风电场、井下煤矿环境里，盐雾、瓦斯加快了绝缘的劣化速度，容易造成相间短路或者对地放电。浪涌电压、电磁干扰都会造成电子元器件绝缘层被击穿，造成控制板卡永久损坏。这类故障隐蔽性大，初期只有微弱的泄漏电流或者绝缘电阻下降，常规巡检不能发现，必须依靠在线局放监测、红外热成像等手段才能早期发现。一旦故障发展成显性短路，就会引起电弧闪爆，对人员和设备安全造成直接威胁，所以电气回路定期绝缘测试、连接点温度监测属于预防性维护的第一步。

2.2 系统工作故障

自动化系统的故障通常划分为硬件故障与软件故障两大类。其中硬件故障指电子自动化设备内部各类装置、元器件或功能组件发生物理失效，直接导致设备整体或局部功能丧失、无法正常运行。而软件故障并非仅由代码本身缺陷引发，现场运维人员若对系统权限边界、操作流程不熟悉，越权操作、误触参数等不规范作业行为，同样会触发软件层面的运行异常，进而引发系统停机等问题。因此，运维人员需系统提升专业技能，熟练掌握系统各模块的功能逻辑与操作规范，从人为操作源头上规避此类故障风险。硬件故障多为控制器死机、通信断开、传感器漂移、执行机构卡顿等，其根本原因在于元器件老化的缘故、接插件松动的情况、电源出现波动的现象或者环境受到腐蚀的影响等[2]。软件故障包含程序逻辑漏洞、参数配置失误、通信协议不符、上位机数据库异常等，一般会在系统更新或者参数变动之后突然出现。两类故障互相交织的时候，排查的难度就会增大，比如传感器数据异常是由硬件漂移造成的，也可能是由于软件滤波算法失效引起的。因此，建立故障树分析模型并采用冗余备份的方式，是提高自动化系统可靠性的主要手段。

2.3 机械设备故障

机械设备故障在能源行业电气自动化系统中主要集中在电机、泵组、风机、齿轮箱、传动机构等旋转设备上，故障的主要表现是振动异常、轴承磨损、轴系不对中、机械松动、润滑失效。电机长期运转之后，轴承滚道及滚动体由于疲劳而产生点蚀或者剥落，从而引起高频振动，并且通过壳体传递到传感器上，如果不加以处理的话，就会发展成抱轴或者扫膛事故。风机、泵组的叶轮在含尘气流或者浆液中不断受到磨损，造成动平衡被破坏，振动幅值随着转速的增大而呈指数级增长，从而拉断基础地脚螺栓。机械故障的发展过程比较缓慢，由最初的微小摩擦发展到最后的功能丧失一般要经过几个月或者更长时间，给预测性维护留出一定的时窗。利用振动频谱分析、油液磨粒检测、声发射监测等手段可以准确找到故障部位及劣化阶段，在设备完全失效之前就进行计划性检修，防止非计划停机带来的连锁生产损失。

2.4 网络通信故障

网络通信故障是造成能源自动化系统不能协同工作的主要因素，涉及现场总线、工业以太网、无线通信以及各种协议转换等各个部分。在大型火电厂或者新能源集控中心中，数以万计的 I/O 测点依靠 Profibus、Modbus、IEC61850 等协议来完成数据交互，通信电缆被强电磁场感应造成共模干扰，导致报文校验失败或者帧丢失。光纤链路因为弯曲过大、接头被污染或者受到雷击而产生光衰增大，造成通信出现间歇性的中断。交换机和路由器端口老化、地址冲突或者出现广播风暴都会造成整个子网瘫痪。软件层协议栈异常、IP 地址冲突、防火墙拦截、主站轮询超时等也会造成通信中断，但是很难找到原因。网络故障具有很强的级联放大效应，一个节点掉线就会导致上位机画面数据被冻结，控制指令不能下发，严重时还会造成全站联锁停机。因此建立冗余环网结构、设置网络状态监视探针、开展通信质量趋势分析，都是保证自动化系统信息通道高可用性所必需的[3]。

3 能源行业电气自动化设备故障监测与管理

3.1 在线监测体系建设

电气回路绝缘老化、接触不良等隐蔽性较强，需要建立电气量、温度量、绝缘状态的多参数在线监测系统。在高压开关柜、变压器等重要节点处安装无线测温传感器，对连接点由于螺栓松动引起温升的变化

进行实时监测，把事后抢修转变为事前预警。对电缆网络、变频器回路等设置局部放电在线监测装置，利用特高频、超声波传感器捕捉绝缘介质内部微弱放电信号，用相位分辨图谱分析技术识别放电类型及发展阶段。在配电回路中安装智能电动机保护器和电能质量分析仪，对电流谐波、电压波动、泄漏电流等进行连续监测，得到设备健康基线模型。

3.2 预测性维护与故障诊断

对机械设备振动异常、轴承磨损等存在较长发展周期的故障来说，需要创建以多源信息融合为基础的预测性维护体系。在电机、风机、泵组、齿轮箱等旋转设备上装设振动传感器和油液磨粒监测单元，获取振动频谱、包络解调信号以及润滑油中金属颗粒的浓度和形貌特征。通过比较正常状态下基准指纹库，用趋势外推法来估计剩余使用寿命，在设备完全失效之前发出检修工单。用网络状态监视探针、协议分析工具对网络通信故障实施即时观测，查看报文丢失率、通信延迟、光链路衰减等状况，并且借助冗余环网自愈切换记录找出间歇性中断的缘由。在诊断环节使用故障树分析模型，将电气回路异常、控制逻辑错误、通信中断等现象同底层硬件故障、软件漏洞、参数配置失当等根因进行因果映射，使运维人员很快找到问题的层次。由被动应对转为主动预判的运维模式，大大缩短了故障排查的时间，消除了由于过度检修和漏检而造成的矛盾[4]。

3.3 冗余容错与应急联动

为保证自动化系统控制器不会出现死机、通信中断、传感器漂移等故障，需从架构上设计出冗余容错和应急联动的机制。控制层采用双机热备或者控制器冗余配置，当主CPU检测到自身出现异常或者通信心跳丢失的时候，备用单元会在毫秒级之内完成无扰切换，保证控制逻辑不会被中断。关键执行回路设置硬接线后备操作通道，在网络控制失效时，运行人员可以就地手动操作来保证设备的基本安全状态。通信网络层面创建环网拓扑，并开启快速生成树协议，单点光纤断裂的时候链路可以在几十毫秒之内重组起来，防止整个子网瘫痪。软件系统实行版本管理与配置备份，程序修改之前会自动生成快照，出现异常情况时可以一键回滚到稳定的版本[5]。同时，将自动化系统的故障告警信号同视频监控系统、门禁系统以及消防系统联动起来，当发生保护动作或者设备跳闸的时候，会自动弹出对应的摄像头画面，解锁逃生通道，并且启动灭火装置。多层次容错和联动的设计把单点故障的影响范围缩到最小，给能源生产的连续性、安全性提供结构上的保证。

3.4 全生命周期运维管理

对设备从投入运行到报废各个阶段的故障风险发展变化规律进行研究，创建覆盖设备规划、采购、安装、运行、维护、检修直到报废全过程的全面运维管理体系。根据FMEA分析结果来确定设备的可靠性指标以及监测接口的要求，选择具有自诊断功能、标准通信协议的产品。安装调试阶段创建完备的电子台账，记载设备型号、出厂参数、安装方位及最初试验数据，给之后的状态评定提供参照标准。运行过程中采取分级巡检方式，即“在线监测告警+定期预防性试验+专项技术监督”，并且按照设备的重要性及风险程度来改变巡检频次和内容。检修管理实行工单闭环制度，每次发生故障或者计划检修之后，对设备的健康状况进行更新，并且记录下故障样本以及维修成果。备件管理根据故障统计、寿命预测的结果来改善库存结构，保证关键元器件可以被替换。最终依靠EAM系统同监测平台的深度融合，实现设备资产价值、可靠性以及运维成本的全面最佳，促使能源企业由依靠经验开展管理转变为依靠数据进行精细化管理[6]。

4 结束语

能源行业电气自动化设备故障监测和管理属于一项包含感知、诊断、决策以及执行等环节的综合性工程，依靠在线监测捕捉到早期异常，预测性维护改进检修时机，冗余容错缩减故障影响，全生命周期管理累积资产知识，这四个部分互相联系，形成闭环管控链条。未来，需融合数字孪生、边缘智能、大模型等先进技术，使设备运维朝着更高层次的自主认知、协同决策发展。持续改进监测精度并推行管理流程标准化，是保证能源生产安全、降低消耗的有效手段，需要产、学、研、用各方面共同努力。

参考文献：

[1] 周毅忠.电气自动化设备安全监测与故障诊断技术分析[J].电力设备管理,2025(22):26-28.
[2] 虞自强.智能电气自动化技术的创新发展与融合应用探索[J].中国战略新兴产业,2025(17):136-139.
[3] 刘钊,陈彬琦,张杰.浅谈电气自动化现状及其与人工智能融合的展望[J].工程建设与设计,2025(11):147-149.
[4] 周吉林.电气自动化设备安全监测与故障诊断技术研究[J].中国新技术新产品,2025(11):137-139.
[5] 凌瑜.基于物联网技术的电气自动化设备监测与故障诊断[J].电气技术与经济,2024(06):150-152.
[6] 李威.电气系统及其自动化在工业生产中的应用研究[C]//中国智慧工程研究会.2024智慧施工与规划设计学术交流会论文集,2024.