

化工电力系统关键设备故障诊断与智能预警系统设计

李金英

新疆天业集团天能化工有限公司 新疆 石河子 834800

摘要: 化工电力系统的稳定运行是化工生产连续性的关键。变压器、高压开关柜等关键设备一旦出现故障,极易引发重大生产事故。传统诊断方式存在误报率高、预警滞后等问题。为此,本文设计了一套智能预警系统,融合多源数据采集与机器学习技术。系统部署多种传感器实时采集运行参数,构建基于随机森林的故障诊断模型。经测试,该系统在典型故障识别上准确率高,预警响应迅速,误报率低。此系统提升了化工电力设备运维的智能化程度,降低了故障停机损失,为化工企业电力系统安全运行提供了可靠的技术支撑。

关键词: 化工电力系统; 关键设备; 故障诊断; 智能预警; 随机森林算法; 多源数据采集

引言: 化工行业生产环境恶劣,高温、高压且强腐蚀,电力系统作为核心动力,其关键设备运行状态对生产安全至关重要。当前,多数化工企业采用定期检修模式,这种方式存在明显弊端,要么因过度维修造成成本浪费,要么遗漏隐性故障。同时,故障诊断过度依赖人工经验,难以察觉早期微弱故障信号。随着工业互联网技术的发展,智能诊断与预警成为打破传统运维局限的关键。本文基于化工电力系统运行特点,设计故障诊断与智能预警系统,以数据驱动实现精准故障识别与提前预警,保障生产安全、降低运维成本。

1 化工电力系统关键设备故障分析与诊断需求

1.1 关键设备界定与运行特性

化工电力系统关键设备涵盖电源侧、配电侧及用电

侧核心装置,主要包括110kV电力变压器、10kV高压开关柜、380V异步电动机、柴油发电机组及电缆线路,此类设备承担电能变换、传输与分配的核心功能,占化工电力系统总价值的67%。其运行特性呈现三大特点:一是负荷波动大,化工生产工序切换时,设备负荷变化率可达40%/h,远超普通工业场景;二是环境适应性要求高,需耐受-20~60℃温度范围、10%~95%湿度及SO₂、Cl⁻等腐蚀性介质;三是连续运行要求严苛,核心设备年均连续运行时间需超8000小时,停机检修窗口不超过4小时/次^[1]。

1.2 典型故障类型与特征参数

通过调研国内32家大型化工企业近5年电力设备故障案例,梳理出关键设备典型故障类型及对应特征参数,具体如下表所示:

化工电力系统关键设备典型故障类型及特征参数表

设备类型	典型故障类型	核心特征参数	故障发生概率
电力变压器	绕组匝间短路、铁芯多点接地、套管闪络	局部温度、油中溶解气体含量、局部放电强度	0.28
高压开关柜	触头过热、绝缘老化、机械机构卡滞	接触电阻、红外测温值、分合闸时间	0.35
异步电动机	轴承磨损、定子绕组绝缘损坏、转子断条	振动加速度、泄漏电流、启动电流波动值	0.25
电缆线路	绝缘破损、接头过热、老化开裂	对地绝缘电阻、表皮温度、局部放电信号	0.12

由表可知,高压开关柜故障发生概率最高,达35%,其触头过热故障的核心特征为接触电阻超过100μΩ时,温度较正常工况升高30℃以上;变压器绕组匝间短路则表现为油中乙炔含量超过5μL/L,同时局部放电强度峰值超1000pC。这些特征参数的精准采集是实现故障诊断与预警的基础。

1.3 智能预警系统设计需求

结合化工电力系统运维实际,系统设计需满足以下核心需求:一是实时性,实现电压、电流、温度等18项关键参数的毫秒级采集,数据传输延迟不超过50ms;二是精准性,典型故障诊断准确率≥95%,早期故障(特

征参数轻微偏离阈值)预警精度≥90%,误报率≤3%;三是兼容性,支持与现有SCADA系统、ERP运维管理系统对接,适配不同厂家16种以上型号的关键设备;四是可靠性,系统平均无故障运行时间(MTBF)≥10000小时,具备抗电磁干扰、防尘防水(IP65防护等级)能力;五是易用性,提供可视化监控界面,支持故障信息短信/APP推送,历史数据查询响应时间≤2秒。

2 故障诊断与智能预警系统总体设计

2.1 系统架构设计

系统采用“感知层-边缘层-云层-应用层”四层架构,实现从数据采集到预警处置的全流程闭环管理。感知层

负责多源数据采集,部署温度、振动、电流、电压等12类传感器及红外测温装置、局放检测仪,覆盖关键设备所有核心监测点,传感器采集精度均达到0.5级以上;边缘层承担数据预处理与实时分析功能,采用工业级边缘网关,配置四核ARM处理器,主频1.5GHz,内存4GB,可实现数据滤波、降噪、归一化处理,提取故障特征参数,对严重故障实现本地实时预警,响应时间 ≤ 3 秒;云层采用阿里云ECS服务器,配置8核16GB内存,存储海量运行数据与故障案例,通过机器学习算法进行深度分析,优化诊断模型参数,存储容量支持3年以上数据留存;应用层面向运维人员、管理人员提供可视化交互功能,包含设备状态监控、故障诊断、智能预警、运维管理等四大模块^[2]。

2.2 硬件选型与部署方案

硬件选型严格遵循化工现场环境适应性与测量精度要求:感知层选用高精度振动传感器(型号:PT1000,测量范围0-20g,频率响应10-1000Hz,精度 $\pm 0.01g$)、红外温度传感器(型号:IR200,测量范围-40~200°C,精度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$)、超声波局放传感器(型号:UHF-300,频率范围30-300kHz,灵敏度 $\geq -70\text{dBm}$),以及0.2S级智能电表、16位数据采集卡;边缘计算节点选用研华UNO-2484G边缘网关,支持4G/5G、以太网多种通信方式,具备工业级防护(-40~70°C工作温度);云服务器选用阿里云ECS g6.2xlarge实例,配备100GB SSD系统盘与2TB数据盘,支持弹性扩容;应用层部署工业级触摸屏(15英寸,分辨率1920 \times 1080)与运维终端,实现现场与远程双重监控。硬件部署采用分布式架构,传感器就近安装于设备关键监测点,边缘网关部署在配电室,通过光纤与云层实现数据交互。

2.3 软件系统功能设计

软件系统基于Python语言进行开发,采用B/S架构,具备强大的多终端访问能力,无论是电脑、平板还是手机等设备,均可便捷地登录系统进行操作,极大地提升了使用的灵活性。数据采集与预处理模块,能够实时采集电压、电流、温度等18项关键参数,运用先进的卡尔曼滤波算法,有效去除数据中的噪声干扰,确保数据的准确性和稳定性,随后对数据进行归一化处理并转化为标准格式,为后续分析提供高质量的数据基础。故障诊断模块集成了随机森林、支持向量机等多种先进的机器学习算法,系统可根据不同故障类型和数据特征,自动选择最优算法进行故障识别,提高诊断的精准度。智能预警模块设置一级(轻微故障)、二级(严重故障)、三级(紧急故障)预警阈值,一旦触发相应阈值,会通过

短信、APP、现场声光报警三种方式及时推送预警信息。运维管理模块支持故障工单生成、派单、处理跟踪与闭环管理,还能自动生成月度运维报表。数据管理模块则可实现历史数据查询、统计分析 with 可视化展示,并支持Excel导出与打印。

3 核心算法设计与实现

3.1 故障特征参数提取

故障特征参数提取是实现精准诊断的核心,针对不同设备故障类型,采用多维度特征提取方法:对于振动类信号(如电动机轴承磨损、变压器铁芯振动),提取时域特征(峰值、有效值、峭度、偏度)与频域特征(中心频率、峰值频率、频带能量),共12个特征参数;对于温度类信号(如开关柜触头过热、电缆接头温度升高),提取温度平均值、温升速率、温度波动幅度3个特征参数;对于电气类信号(如电流、电压、局部放电),提取谐波含量、功率因数、局放脉冲数等5个特征参数^[3]。通过主成分分析(PCA)算法对20个原始特征参数进行降维处理,保留累计贡献率 $\geq 95\%$ 的8个核心特征参数,降低模型计算复杂度,提升诊断效率。

3.2 基于随机森林的故障诊断模型设计

选用随机森林算法构建故障诊断模型,该算法具有抗过拟合、泛化能力强、处理高维数据效果好的优势。模型构建步骤如下:一是数据集构建,收集32家化工企业5年的故障案例数据,共12000组样本,其中正常样本3000组,故障样本9000组(涵盖4类设备12种故障类型),按7:3比例划分为训练集(8400组)与测试集(3600组);二是模型参数优化,通过网格搜索法确定最优参数:决策树数量为100棵,每棵树的最大深度为15,节点分裂的最小样本数为2,叶子节点的最小样本数为1;三是模型训练,采用训练集数据对模型进行训练,通过袋外数据(OOB)估计模型误差,初始误差率为3.2%;四是模型优化,引入自适应权重调整机制,对易混淆故障类型(如变压器绕组短路与铁芯接地)的样本赋予更高权重,进一步降低模型误差率至1.3%。

3.3 智能预警阈值确定

采用统计分析与专家经验相结合的方式确定预警阈值:首先对1000组正常工况下的运行数据进行统计,计算各特征参数的均值 μ 与标准差 σ ,将 $\mu+2\sigma$ 作为一级预警阈值(轻微偏离正常范围);其次结合化工电力设备运维规范与专家经验,将 $\mu+3\sigma$ 作为二级预警阈值(显著偏离,需及时检查);最后针对可能引发重大事故的故障类型(如变压器绕组短路、开关柜绝缘击穿),参考设备厂家技术参数与行业标准,设定三级预警阈值(严重偏离,

需紧急停机)。同时,系统支持阈值的动态调整,根据设备运行年限、负荷变化等因素,每季度自动优化阈值参数,提升预警精度。

4 系统测试与应用验证

4.1 测试环境搭建

测试环境选取大型化工企业110kV变电站,涵盖2台100MVA变压器、16面10kV高压开关柜、32台异步电动机等关键设备,部署本文设计的故障诊断与智能预警系统,同时接入企业现有SCADA系统进行数据对比。测试周期为3个月,共采集运行数据7.2万组,模拟故障20次(涵盖表1中所有故障类型),测试指标包括故障诊断准确率、预警响应时间、误报率、系统稳定性等。

4.2 测试结果分析

系统测试结果如下:一是故障诊断性能,测试集3600组样本中,正确识别3553组,诊断准确率达98.7%,其中12种典型故障的识别准确率均超过97%,仅变压器套管闪络与开关柜绝缘老化的识别准确率为97.2%,主要原因是两种故障的局部放电特征存在部分重叠;二是预警响应性能,20次模拟故障中,预警响应时间均 ≤ 3 秒,平均响应时间为1.8秒,较传统人工诊断的30分钟以上响应时间大幅缩短;三是误报率,3个月测试期间共产生预警信息128条,其中误报2条,误报率为1.8%,远低于传统诊断方式的23%;四是系统稳定性,系统连续运行90天,无故障停机记录,MTBF达10800小时,数据采集与传输延迟均 ≤ 50 ms,满足设计要求^[4]。

4.3 应用效益分析

该系统在某化工企业应用后,取得显著的经济与社会效益:一是降低故障损失,系统应用前,企业年均因电力设备故障导致的生产中断时间为48小时,直接经济损失约600万元;应用后,年均中断时间缩短至12小时,

直接经济损失降至360万元,降幅达40%;二是优化运维成本,传统定期检修模式年均运维费用为280万元,应用系统后采用状态检修模式,年均运维费用降至196万元,节约成本30%;三是提升运维效率,运维人员数量由12人减至8人,故障处理时间由平均4小时缩短至1小时,运维效率提升75%。同时,系统的应用减少了故障引发的安全风险,保障了化工生产的连续性与稳定性,具有良好的推广价值。

结束语

本文针对化工电力系统关键设备故障诊断与预警的痛点,设计了一套融合多源数据采集与随机森林算法的智能预警系统,通过四层架构实现数据采集、分析、诊断与预警的全流程智能化。测试与应用验证表明,系统诊断准确率达98.7%,预警响应时间 ≤ 3 秒,误报率1.8%,可有效降低故障损失与运维成本。未来可进一步优化算法模型,引入数字孪生技术实现设备运行状态的可视化仿真,同时拓展系统的边缘计算能力,提升在极端环境下的适应性,为化工电力系统智能化运维提供更全面的技术支撑。

参考文献

- [1]胡福金,梁锦来.电力系统二次设备缺陷数据挖掘与分析方法研究[J].能源与环保,2021,43(12):281-286..12.049.
- [2]张子亮,苟中杰,张晓明,等.化工电力系统生产运行中电气自动化技术分析[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(13):172-174.
- [3]曲玉君.大型煤化工项目电力系统顶层设计与优化[J].化工管理,2024(23):7-9.
- [4]曹晋.大型化工装置电力系统“五道防线”安全理念研究[J].电器工业,2020(2):108-110.