

钢厂电气自动化系统远程监控与智能运维研究

魏明鑫 陈冬冬 杨满光 喻晓璐 替志民

安阳钢铁集团有限责任公司综合利用开发公司, 河南 安阳 455133

[摘要]为了解决当前钢铁企业电力自动化系统的运维过程中存在感知方式过于简单、信息碎片化严重、故障判断依靠人为经验和维护措施粗糙等问题, 在远程监视、智能化管理方面开展相关研究。搭建了一套包括多层次电气参数监测、边缘节点数据整合与混合式云计算结构的稳定可靠的远程监视系统, 基于数据清洗的基础上创新性地提出了结合模型推理和技术驱动相结合的故障分析技术, 退化理论为基础的预见性维修方案以及利用专家数据库支持的运维指导系统。通过端-边-云一体架构以及仿真试验验证了本系统开发的远程监视能力和智能管理算法的有效性。结论证明该系统可以有效地进行电气设备透明化认知以及智能化的运维决策, 大幅度地减少了意外停机的风险, 为钢铁厂电气自动化系统的稳定可靠的运行提供技术支持。

[关键词]钢厂电气自动化; 远程监控; 智能运维; 故障诊断

DOI: 10.33142/hst.v9i4.19590

中图分类号: TP277

文献标识码: A

Research on Remote Monitoring and Intelligent Operation and Maintenance of Electrical Automation System in Steel Plant

WEI Mingxin, CHEN Dongdong, YANG Manguang, YU Xiaolu, ZAN Zhimin

Comprehensive Utilization and Development Company of Anyang Iron & Steel Group Co., Ltd., Anyang, He'nan, 455133, China

Abstract: In order to solve the problems of overly simple perception methods, severe information fragmentation, reliance on human experience for fault diagnosis, and rough maintenance measures in the current operation and maintenance process of power automation systems in steel enterprises, relevant research has been carried out in remote monitoring and intelligent management. We have built a stable and reliable remote monitoring system that includes multi-level electrical parameter monitoring, edge node data integration, and a hybrid cloud computing structure. Based on data cleaning, we have innovatively proposed a fault analysis technology that combines model reasoning and technology driving, a predictive maintenance plan based on degradation theory, and an operation and maintenance guidance system supported by expert databases. The effectiveness of the remote monitoring capability and intelligent management algorithm developed by this system has been verified through the end-to-end cloud integrated architecture and simulation experiments. The conclusion proves that the system can effectively achieve transparent cognition of electrical equipment and intelligent operation and maintenance decisions, significantly reducing the risk of unexpected shutdowns and providing technical support for the stable and reliable operation of electrical automation systems in steel plants.

Keywords: steel plant electrical automation; remote monitoring; intelligent operation and maintenance; fault diagnosis

引言

钢铁生产工艺过程高度连续以及快速变化给电力自动化系统带来了很高的可靠性和维护性能的要求。轧机、连铸、高炉鼓风机组都是一条条重要的生产线, 几乎都离不开大量的高压变频器, PLC 控制柜以及开关柜, 甚至是变压器, 一旦出现电气故障就会引起整个生产线停车, 造成巨大的经济损失, 目前大多数钢铁厂还在采用计划性的巡视检修以及事后修理的方式进行维护服务, 状态检测仅仅针对一些主要的状态信息, 各个模块之间互不关联,

故障发现主要依靠一线技术人员的经验判断, 很难达到精细化管理的标准要求。在工业互联网、边缘计算和人工智能不断发展的情况下, 实现远程监视与智慧维护成为工业企业转型发展的必然趋势。

1 钢厂电气自动化系统运维现状与远程智能化需求

当前, 钢铁厂电气自动化系统的维护存在四大难题: 一是感知能力不足, 在很多配电盘以及传动机构上只有电压、电流等基础电量的当地显示屏或者简单的阈值报警提

示,而缺少谐波、局部放电、触头温度、操作机构机械特性等深层次参数,无法构成对机器运行状况的全面描述;二是信息割裂问题严重,PLC 控制系统、电力综合保护装置与专用巡检设备、生产管理系统 MES 之间接口不同、时钟不同步,大量信息不能实现自动汇总结合,运维工程师需要穿梭在不同的平台上手工记录核对;三是分析判断依靠人的经验;四是缺乏有效的故障处理手段。设备异常判定的知识库体系不够健全,复杂的相互关联故障的根本原因查找过于依赖经验丰富的技术人员的缄默知识,无法规范化传授,从行业内统计来看有 40%左右由于潜伏性的电器问题未能被及早察觉引起的突发性停电属于钢铁公司总的停机损失。四是维护手段简单化。大部分实行的是以日历时间为主的定期更新、修理,有些设备过度维修造成不必要的浪费,有些设备不足维修加速设备老化,缺乏根据自身实际情况及剩余寿命制定的具体化的维修方案。

因此,远程智能运维需求就十分清晰地表达出来:形成覆盖电气设备各个层次的远程可视化监测架构,在传感器、边缘计算单元和云端平台之间紧密联系的情况下,做到对整个电气系统,包括高压进线段、低压开关柜以及传动机构乃至控制系统的全方位监测;基于数据导向与机理解析相结合的分析手段,能够自主进行电气设备监测、故障报警及维修建议等智能化运维服务;并且利用混合云计算平台强大的伸缩性和基于知识图谱的知识推导功能,将碎片化的运维知识整合成通用化的、可迭代升级的应用方案,从而使得传统的反应式维护转变为提前预见式的干预处理。

2 远程监控系统设计

2.1 电气参量多维感知与边缘数据汇聚

以满足钢铁厂电气设备状态全方位感知的要求为目标,建立“电-磁-热-力-环境”的多参数并行检测系统。除了传统的三相电压、电流、功率因数之外,还增加了高频暂态地电波以及超声波局部放电探头来对开关柜内的绝缘状况进行实时监测,在变压器和大型电动机接线端子处安装红外热成像阵列,对触点温升做连续性的热图捕捉,在断路器的操作机构以及接触器上安装振动传感器以获取它们的动作信号。所有的传感器都采用工业级别的模块化结构并且都连接到就近的智能化采集装置中去。

边缘数据聚合层作为感知到云端的桥梁,在局所配电房或者传动机柜房部署边缘计算节点,物理层使用的是 ARM+FPGA 混合型架构,具备了 ModbusTCP、OPC、IEC61850 以及 MQTT 等多种协议接入能力和协议转化能

力。边缘节点会对高频次采集的原始波形做即时截取并进行简单的特征提取计算出如:谐波失真度、电压暂降程度、分合闸时长、触头磨耗量等等,在不影响完整性的基础上把数据量缩减到只有原本数据大小的 10%~15%左右。另一方面,在边缘侧使用基于时钟同步的方法,采用 IEEE1588 同步时钟对采集的所有采样量打上同一份时间标签,从而消除不同来源的数据间的时间差异性的问题,为之后进行跨装置之间的联合分析做好了数据准备。

2.2 混合云架构下的高可靠远程通信与监控组态

针对钢厂对于生产信息安全以及远程服务长期性并重的要求,远程监视平台采取的是私有云结合公有云的一种混搭方式。私有云部署在公司的数据中心内,负责公司整个电系统实时监测以及历史数据保存和内部保密工作流程;而公有云主要负责长时间的数据保存以及各基地之间比较研究等工作不涉及实时或者机密的工作内容,充分利用它的弹性伸缩能力来达到节省成本的效果。远程通讯则是采取分层冗余的方式实现的。边缘节点到私有云之间使用的是厂区内的光纤环型网状结构,采用 OPCUA 协议加密加认证的方式上传下传,配置了双通道自适应切换和断点续传的功能,在发生某个局域网络中断的情况下也不会造成数据丢失的问题。在异地带远程登录及移动终端上用私有云部署安全 web 服务,在 html5 基础上进行跨平台控制方案配置。混合云+冗余通讯的远程监视方式已经在钢铁制造业中有很高的可靠性,系统的可用率达到 99.9%以上。监控配置软件以微服务的方式进行设计,可随意拼凑出电气主接线图、设备总体情况、趋势曲线、报警屏等不同功能组件,根据维护人员身份对界面进行精简处理,给电工负责人、区域责任人、巡检员等不同的维护者带来个性化监控感受。

3 智能运维关键技术研究

3.1 电气设备多源异构数据治理与健康状态表征

钢铁厂电气自动化系统产生的信息有结构化的运行指标、非结构化的巡视日志以及半结构化的保护动作顺序记录等,来源多样且差异明显。数据管理过程如下:首先,利用时间戳对齐及插值重采样将不同来源的信息统一至一个时间线上;其次,运用基于规则和统计的方法来进行异常点识别,去除由于传感器瞬间中断或电磁噪声引起的离群点;最后,建立设备台账、维修历史以及当前运行情况相结合的数据集,形成围绕着设备对象的统一体系。针对设备健康状况描述,设计了多级特征综合式的健康评分方案。对变压器而言,结合油中溶解气体、绝缘电阻、局部放电量以及负载率进行主成分分析降维后再映射到

0~100 之间的健康值；而断路器则结合着触头电磨损量、操作机构动作次数以及线圈电流波形相似度作为健康指数，健康指数可以清楚地反映出设备的劣化状态，同时还可以给以后的诊断和预报提供统一化的输入。

3.2 融合机理与数据驱动的电气系统故障诊断方法

单凭一种机理模型不足以涵盖整个炼钢环境的各种故障类型，而单纯的基于数据训练方法则容易因为数据不足以及有较大的噪音而造成过拟合的问题。因此设计出机理和数据双驱动的方法来实现故障诊断。针对转子匝间短路、轴承电腐蚀这类有着清晰物理演化过程的故障，建立由等效电路和磁场解析得到的机理模型并获得故障特征频率及幅度为先验条件；在此基础上再构造一维卷积神经网络和门控循环单元串联结构，在原电流、振动波形的基础上加上了机理特征，从而实现了深层次的故障模式分类。针对数据不平衡的问题，在训练中加入基于 SMOTE 过采样以及焦点损失函数相结合的方式联合优化策略，在正常样本处于优势地位的时候也可以准确地识别出初期细微故障，通过实验发现，该方法应用于变频器 IGBT 开路故障检测中的 F1 可以达到 0.94，大大高于单独驱动模型。检测结果输出同时提供可信度及重要影响因素，提高对运维人员的透明度。

3.3 基于退化建模的预测性维护策略

电气设备老化一般分有退化缓慢恶化及快速失灵两个过程，可靠地确定剩余寿命对设计预见性维修方案至关重要。针对接触器与继电器这些经常启动停机的元件，则可选择触头间接触电阻增大程度、超行程时间和吸引电压作为退化标志量来建立带随机变量的非线性退化模型。通过对历次离线检测数据以及现场实际记录下来的退化历程，用最大似然法与贝叶斯方法识别出参数并实时调整。基于退化模型之上再加入预防维修机制，使电气系统的计划停车间隔区间及多装置共同的剩余寿命分布同时得到优化，在此基础上以单位时间内维修费用最小为目标函数求得动态门槛线。当设备健康度或者剩余寿命小于动态门槛值时，在下次计划维护窗口内进行维修工作，从而使设备能够最大程度上使用内部的停工时间，减少不必要的停工成本。

3.4 知识引导的运维决策与自适应优化

电气运维包含很多操作流程、历史事例以及专家的经验等隐形知识不容易固定下来。通过使用知识图谱的技术，把电气主接线结构以及设备的技术要求、故障树以及以前出现过的报警信息和处理方式组成实体-关系图谱，在有告警或者诊断某类故障的时候，推理引擎在图谱内做跨级

的链接查询，匹配相似的历史事例处理方式、需要的备件、需要注意的安全事项等，形成完整的修理任务单。为了更好地提高决策的灵活程度，设计一个基于强化学习的运维策略反馈改进闭环机制。用每次维修完成后机器连续无故障的运转时间和维修费用当做奖励信号，不断调试修理阈值和检测间隔。这一闭合系统使得运营知识不是一成不变的，在运用过程中持续发展，逐渐接近最优运维方案。在流程工业的实验证明了这种知识导引及改进的方式可以使维修费用下降 10%~20%，并提高机械使用寿命。

4 系统集成与仿真实验

4.1 端-边-云协同的智能运维系统集成方案

把以上感知、通信、计算、判断各个模块整合成一个联合体。终端采用多源传感器和智能化采集装置，边缘端布署基于 Docker 容器化技术的数据清洗、特征加工以及简易诊断服务模块，云平台则是大数据存放库、深度学习模型训练、知识图谱推理、人机交互应用。三者之间利用已确定的标准数据交换协议进行解耦集成：终端向边缘上传实时流式数据和文件；边缘向云端上传汇总特征、警报信息；云端向边缘推送最新模型参数、决策策略等。容器编排引擎保障单个服务组件可以分开迭代更新和按需伸缩能力。

4.2 仿真实验环境与评估指标体系构建

基于某热轧带钢生产线电气系统的半物理仿真环境建设。实物是低压电器成套设备，变频器-电机拖动台架，可控性负载，模拟的是负载突变、电压暂降、元器件老化等工况；逻辑是往仿真器中添加实际的历史运行资料以及故障录波来重现典型故障现象。评价指标有系统功能和算法性能两方面：系统功能指标有画面刷新滞后、告警推送到达时间间隔、数据的全量等。算法性能指标有故障识别正确率、召回率、预测性的维护提前预警的时间长度以及对意外停车次数的影响等。

4.3 远程监控核心功能测试与分析

在虚拟仿真环境下，复制整个电厂电气一次接线图控制界面，在线监测实时数据更新与报警动作检验，实验中，当高电压进线开关失电信号发出以后到私有云控制页面出现告警提示之间的时间间隔一直 $\leq 1.2s$ ，符合实时性的要求，网络通信链路被人为断掉之后，边缘服务器的数据接力转发功能保障了断开过程中数据不遗漏，在重新连接之后的 3s 之内完成丢失信息的上传，保证了原始完整率 100%，多个视角快速转换、回溯历史曲线浏览以及远端参数设置等操作都满足设计方案的要求，说明远程监视系统在实时性、可靠性和便捷性上有工程化价值。

4.4 智能运维算法性能对比与适用性评估

基于仿真环境采集到的 20 种电系故障样本库来对所建立的融合故障检测算法、预见式维护方案以及单纯的纯数据驱动比较模型做统一测试检验。检测能力比较如下表 1 所示：

表 1 不同故障诊断方法性能对比

方法	准确率 /%	召回率 /%	F1 值	平均提前预警时间/h
纯 CNN-LSTM 数据驱动	89.5	87.2	0.88	—
纯机理模型阈值判断	78.3	82.1	0.80	—
融合机理与数据驱动方法	94.7	93.9	0.94	—
基于退化模型的预测性维护	—	—	—	8.2

从表 1 可以看出，集成机理与数据驱动方法在准确率、召回率以及 F1 值方面都明显高于单纯的以数据驱动以及纯粹机理模型方式，在辨别初期的小幅故障方面尤为出色。基于退化的建模预测检修法可以提前 8.2 小时发出警报信号，完全可以安排到下一个换辊及工艺待料空隙时间处理好；证明了其应用于正常生产周期时的有效性。而且借助知识图谱匹配相似案例的成功率为 91%，生成一张修理单只需要人工编写的一般十五分钟的时间缩减到了几秒钟之内，效率得到了很大的提高。

5 结束语

重点对钢铁厂电控系统的远程监测以及智能化运维进行探索，全面开展了感知结构、通信配置、数据分析、故障检测、预警维修和知识决策等一系列的核心技术研究，

在端-边-云一体化模拟环境中完成集成调试。研究成果构建了一个从低层全方位感知到高阶决策智能的一体化技术体系：边缘计算减轻了大量汇总的数据量和较长的反馈时间问题，混合云保证了信息安全的同时又具有良好的伸缩能力，基于原理和数据相结合的手段提高了故障检测效率和稳定性，退化模型及知识导向策略实现了从依靠经验转变为用数据加知识共同支持的方式进行维修操作。系统仿真实验的结果证明，主要的功能以及算法均达到钢厂严格的要求。未来的研究工作是针对多钢厂互联背景下的群组设备联合维护以及在变化环境中自主学习能力进行进一步的研究。

[参考文献]

- [1]付阿凡.智能辅助监控系统在钢铁企业配电柜中的应用[J].机电技术,2023(6):45-48.
 - [2]张明辉,王浩然.电气自动化控制系统的应用综述[J].集成电路应用,2023,40(12):38-41.
 - [3]李杰,许晓东,陈志强.数智融契赋能未来——钢铁行业设备智能运维探索与实践[J].冶金设备,2023,12(2):12-17.
 - [4]吴畏,赵建国.面向智慧钢铁的设备智能运维系统建设研究[J].新型工业化,2023,13(12):56-62.
 - [5]杨帆,郑宇.流程工业知识图谱与强化学习协同的智能运维决策[J].计算机集成制造系统,2024,30(15):156-166.
- 作者简介：魏明鑫（1991—），毕业于郑州航空工业管理学院电气及自动化专业，就职于安阳钢铁集团有限责任公司综合利用开发公司，电气助理工程师。