

Analysis of digital transformation of substation operation and maintenance and construction strategy of intelligent inspection system

Shuaizhao Wen¹ Haotian Cui²

1. State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd. Langfang Power Supply Company, Langfang, Hebei, 065000, China

2. State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd. Tangshan Power Supply Company, Tangshan, Hebei, 063000, China

Abstract

With the continuous development of China's power system and the integration of large-scale renewable energy into the grid, traditional substation operation and maintenance (O&M) models have increasingly revealed shortcomings in system reliability, lean management, and safety protection. Moreover, as most traditional O&M relies on manual experience, data collection and processing are often delayed, failing to meet the grid's requirements for real-time monitoring, intelligent decision-making, and autonomous control. To ensure the safe and stable operation of power grids, it has become particularly crucial to promote digital transformation in substation O&M and establish an intelligent inspection system to enhance maintenance capabilities. In light of this, the following analysis focuses on China's power system substation O&M practices, discussing both digital transformation and intelligent inspection system construction for practical reference.

Keywords

substation operation and maintenance; digital transformation; intelligent inspection system; construction; strategy

变电运维数字化转型与智能巡检体系构建策略探析

温帅召¹ 崔浩天²

1. 国网冀北电力有限公司廊坊供电公司, 中国·河北 廊坊 065000

2. 国网冀北电力有限公司唐山供电公司, 中国·河北 唐山 063000

摘要

伴随着我国电力系统不断发展以及大量新能源电力并网, 传统的变电运维模式在系统可靠性、精益化管理和安全防护等方面存在的弊端日益显现, 加之传统运维大多依靠人工经验进行, 数据采集和处理不够及时且无法有效满足电网开展实时感知、智能决策、自主控制的要求。为电网的安全稳定运行, 通过推动变电运维的数字化转型并构建智能巡检体系提升运维水平就显得尤为必要。有鉴于此, 下文围绕我国电力系统变电运维实际, 分别对数字化转型和智能巡检体系构建两个方面进行了讨论分析, 以供参考。

关键词

变电运维; 数字化转型; 智能巡检体系; 构建; 策略

1 引言

在当今数字化浪潮席卷全球的大背景下, 电力行业作为国家能源体系的核心组成部分, 正经历着深刻的数字化转型。变电站作为电力系统中实现电压变换、电能分配和电力控制的关键节点, 其运维工作的效率直接关系到电力系统的安全稳定运行和供电可靠性。因此, 深入研究新时期下数字化转型与智能巡检体系构建策略, 具有重要的理论意义和实践价值。

【作者简介】温帅召(1994-), 男, 中国河北邯郸人, 硕士, 工程师, 从事变电运维研究。

2 变电运维数字化转型策略

2.1 构建统一的数据采集与融合平台

电力系统变电运维数字化转型进程里需要构建统一数据采集融合平台, 其核心在于采集层、处理层和应用层分别设计。采集层要严格按照 IEC61850 标准、国家电网通信规约等相关要求, 实现对一次设备、二次系统、环境监测、安防等子系统的全面接入。针对主变压器套管、断路器操动机构、GIS 气室、电缆终端处布设高精度光纤温度传感器、局放在线监测单元、气体组分分析装置与高频电流互感器, 随后为实现采样数据毫秒级时间同步还应部署同步相量测量单元, 以保证暂态过程与工况数据完整^[1]。处理层需在站端部署边缘计算节点, 集成高性能 DSP 与 FPGA, 对数据

进行去噪、小波特征提取及压缩编码处理,降低广域传输压力,同时保留关键参数用于异常识别与故障预警。平台架构采用分层分布式体系,站端完成应急控制与本地存储,区域层汇聚数据并实现安全隔离,云端部署时序数据库及分布式存储集群,支持大规模数据归档与深度学习分析,实现状态感知与趋势预测。应用层需建设统一接口总线,基于 RESTful API 与 CIM 模型实现与调度系统、运维管理系统及资产管理系统互联互通,采用消息中间件实现数据流式订阅与并发调用。平台同时建立统一编码与元数据管理策略,对设备、工况及运维事件实现跨系统追溯与一致性校验,保障全业务链条数据的可用性和完整性。

2.2 引入人工智能驱动故障诊断与预测机制

引入人工智能驱动的故障诊断与预测机制核心是基于历史运行曲线、实时监测信号与检修信息为一体的变电设备全生命周期状态感知。将高性能传感器布置到变电站中主变、断路器、电容电抗装置等重要设备,以获取包括电流、电压、油温、温湿度等数据,接着以边缘计算节点对它们开展预处理,保证数据中所含有的异常工况特征实现低时延下向数据中心进行高效、准确上传;与此同时,应用深度卷积神经网络联合图神经网络算法进行建立变电设备间的拓扑结构模型及空间属性刻画,让原本一些局部类难以辨识的故障(如绕组局部过热、套管绝缘介质劣化等)得到精准识别,对于跨站点、跨电压等级的样本数据分布不均问题可以利用迁移学习的方法把前期成熟模型参数迁移到数据稀缺的变电设备场景上,从而减弱样本数量不足对模型收敛性带来的影响。在预测机制中利用时间序列建模、动态贝叶斯网络建立变电设备寿命曲线自适应更新机制,依据在役运行设备的实际负荷曲线、外界天气因素、操作切换频次等实际进行寿命衰减速率动态修正,并据此预警可能出现失效节点^[2]。面对复杂运行环境下变电设备会遇到的各种不确定问题,应基于强化学习算法构建决策反馈闭环推动诊断与预测机制能够长期迭代,并不断更新自身策略。另外,以统一数据接口将诊断结果、预测信息等汇集到调度中心系统,后者借助运维管理平台的工单流转模块在接收到风险故障等级信息第一时间自动生成相应的检修计划,并优化分发调度指令,继而形成变电设备状态评估、风险预测、作业执行的智能化运维流程。

2.3 建立面向全生命周期的运维管理体系

针对变电站运维,应构建覆盖设备全生命周期的数字化管理体系:在设备选型及采购环节,需利用 BIM 与设备语义建模技术建立部件级精细化模型,并将 IEC61850 SCL 配置文件、出厂试验数据与施工规范一体化存档,确保设计、安装与调试阶段的数据可追溯与跨环节共享;在设备投运阶段,需依托与 SCADA、PMU 及历史时序数据库联通的数字孪生平台,实现物理机理模型与监测数据的多源融合,开展运行状态动态仿真、剩余寿命预测以及健康指数计算,

并结合油中气体分析、局放在线监测、红外测温与振动采集构建多维状态量化体系,触发基于深度学习算法的智能诊断与趋势预警;在日常运维环节,需通过智能移动终端、二维码或 NFC 资产标识与 CMMS 系统达到自动分配变电检修工单、实时定位和监控作业过程及电子闭环验收等,从而保证现场作业严格按照调度中心要求开展;对于涉及关键变电设备的检修决策可采用基于损伤演化机理寿命评估模型、全生命周期成本/净现值分析方法以及风险导向维护决策引擎将检修时间、方案、备品备件与停电计划自动计算出;对于知识的沉淀及辅助决策,需要建设针对变电设备的标准化知识库,并且将故障模式、故障原因及处置策略三者予以结构化存储,然后部署融合规则推理、机器学习的混合专家系统供现场运维人员在实际工作时开展相关信息快速查询检索、增强现实操作提示以及确定最佳的工作路径等。另外,该体系中全部数据均须经满足安全网关的标准和分层分级的安全访问控制及权限验证,从而做到防篡改、防泄露以及可追溯。

3 变电运维智能巡检体系构建策略

3.1 基于多维感知技术的全景监测体系

变电运维智能巡检中基于多维感知技术的全景监测体系建设,要从站区、巡检两方面着手,以实现广度和深度兼顾的综合性感知体系结构的构建。针对站区监控对象而言,依据变电设备电压等级和设备功能开展高清可见光摄像机、红外热像仪、局部放电传感器以及温湿度传感器等差异化感知终端的分区分级部署,具体为:主变、高压开关柜位置部署高清可见光摄像机和红外热像仪,以实时成像监测油温、套管接头温升、触头过热等缺陷;局部放电传感器部署于 GIS 和断路器区域,借助于超声、超高频信号同步采集的方式开展局放特征量的采集工作;光纤光谱型的气体泄漏检测装置部署于气体绝缘设备区域,以实现快速判别六氟化硫及其分解产物的目的;站区内则根据实际需要分别部署温湿度、风速、粉尘浓度等多种传感器,以对变电设备运行条件和外部环境信息实时掌握^[3]。针对巡检层面则建立起空地协同的立体巡检体系,具体为:空中方面采用配装高分辨率成像单元、多光谱传感器的无人机开展定期巡查,识别引线、耐张塔、避雷针等构筑物上是否存在外观损伤、锈蚀及异物附着情况;地面方面利用具备红外测温功能、高清视觉识别以及电气接点检测的轮式智能巡检机器人周期性开展开关柜指示灯状态与绝缘子污秽等级判别、设备铭牌信息识别等工作。另外,为了实现监测高效信息处理,站端部署边缘计算节点,随后针对所获取视频和图像等原始数据以卷积神经网络开展实时解析,接着再借助于卡尔曼滤波及贝叶斯融合算法开展多种类型源数据之间在时空维度上信息对齐和异常特征增强,从而减轻单个传感器噪声干扰影响到数据诊断结果准确性。

3.2 构建智能任务调度与自主巡检机制

智能任务调度与自主巡检机制的构建核心在于多维数

据融合和智能算法两方面,具体为:建立起包括变电设备运行参数、历史缺陷分布情况、外部环境因素在内的多维度建模体系,针对设备状态以时间序列数据库和图神经网络开展解析,随后再利用所部署温湿度、风速、雷击等传感器采集的数据构成实时动态更新的风险评估矩阵。与此同时,采用强化学习和分布式调度优化算法在不断地迭代训练中对不同任务的优先级进行调整,以实现根据变电设备的运行状况对工作任务的派发进行优化升级,从而能够及时更新工作情况并进行重点的防护以及抢修。巡检执行环节则以无人化巡检设备来完成相关巡检任务,如使用搭载有 SLAM 技术以及三维 GIS 地图的无人机或地面巡检机器人自主开展路径规划、导航工作,同时借助地形障碍物躲避算法、任务分段调度方案实现复杂站区环境中的连续作业。同时调度系统应该采用基于边缘计算的任务同步方式针对无人机或机器人巡检任务类型、作业区域进行动态分配。此外环境状况和设备状态实际情况对巡检频率予以动态调节,如遇到台风、暴雨等恶劣天气条件则增加对站外线路、避雷器的巡检任务权重,并以此作出相关加权调度安排实现重点覆盖^[4]。另外,出于确保自主巡检任务高效稳定开展,该机制中还应实施任务冗余和故障切换模式,即当某一台无人机或机器人出现由于通信断开、电池耗尽或任务执行出错等情况不能完成巡检任务时,依据余量推算迅速制定新任务计划并激活备用无人机或机器人代替其继续工作,从而保证巡检任务顺利完成。

3.3 建立基于知识图谱与智能分析的缺陷识别平台

电力系统变电运维智能巡检体系构建中,基于知识图谱与智能分析的缺陷识别平台应形成跨层级、多源异构数据的统一建模框架。首先,在数据建模层面,将设备铭牌参数、主回路构型、绝缘子串及断路器机构等关键部件结构特征标准化抽取,并结合热老化、机械磨损、局部放电及表面污染等典型故障机理进行本体化表达,从而在知识图谱中建立设备—部件—缺陷之间的语义关联。其次,在图像与信号智能识别方面,部署基于深度卷积神经网络与多尺度特征融合的视觉模型,通过红外热像、可见光图像和局放波形联合输入,实现对裂纹扩展、锈蚀斑点、绝缘龟裂及异物沉积的多模态识别,并引入图像分割与注意力机制提高边界模糊或小尺寸

缺陷检出能力。文本和语义处理方面利用 BERT 类预训练语言模型、命名实体识别的方法把包括历史巡检报告、缺陷记录、专家规程转成结构化的知识,随后将其与图谱节点间做动态关联进而构建一种可演化的知识库。同时为保证模型具有良好的泛化能力和鲁棒性可以采用联邦学习的架构,在跨站点数据间基于加密算法进行跨站点参数加密聚合来完成协同训练工作,从而促使不断地对模型进行迭代优化^[5]。针对在线更新方面则可以在接收到新的缺陷样本后利用增量学习的方式快速地对其作出标注及迭代学习,以使得该模型针对不同的运行环境也能够进行更新。最后,在识别结果和风险评估方面使用贝叶斯网络或者模糊综合评价的方式来确定出各个缺陷的等级、潜在失效模式以及风险传播路径,随后接人工单管理系统自动生成出具体的处置措施、建议采取的资源调度和优先级排序等方案,从而完成识别—处置全流程闭环。

4 结语

综上所述,变电运维数字化转型与智能巡检体系建设是顺应新型电力系统发展需求的一项关键内容。对此,在变电运维数字化转型进程里借助于建立统一的数据平台,以人工智能为动力的诊断与预测机制地引入和构建全生命周期管理平台推动其朝着依靠数据与模型驱动新模式发展。另外,在变电站运用多种感知手段、智能调度、知识图谱的巡检体系实现 24 小时监控及全面巡检的目的,有效增强识别运维能力。

参考文献

- [1] 迟丽芸,于汉启.电网企业配电网运维数字化转型升级管理[J].企业管理,2022(S1):158-159.
- [2] 潘利,乔真.500kV变电站数字化转型运维技术研究[J].中国科技纵横,2024(23):11-13.
- [3] 何永慧.智能自动化运维:开启企业数字化转型新篇章[J].2025.
- [4] 刘东,王军,姜仆壮,等.变电站智慧“三维”联合巡检体系的构建和应用[C]//2023电力行业信息化年会.国网辽宁省电力有限公司朝阳供电公司,2023.
- [5] 赵于风.变电站智能巡检应用现状及解决措施[J].幸福生活指南,2020(43):0168-0168.