

Application analysis of key technologies for intelligent substation operation and maintenance

Zongtian Zhang Liming Ding Jia Ma Feiya Ma

Changji Power Supply Company of State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Changji, Xinjiang, 831100, China

Abstract

Intelligent substations play a pivotal role in the digital transformation and smart upgrading of power grids, with operation and maintenance shifting from traditional periodic inspections to proactive management based on condition and risk. This paper reviews the overall framework and management characteristics of intelligent substation O&M, highlighting the systematic and collaborative nature of its organizational structure, workflows, and smart features. It focuses on the practical application mechanisms and performance of key technologies such as online monitoring and condition assessment, intelligent inspection and remote diagnosis, as well as O&M data integration and information-sharing platforms. The study also examines how safety risk identification, graded control, on-site operation management, and emergency response mechanisms provide crucial support for enhancing O&M safety levels.

Keywords

Intelligent substation; O&M management; Online monitoring; Intelligent inspection; Performance evaluation

智能变电站运维关键技术应用分析

张宗田 丁立明 马佳 马菲雅

国网新疆电力有限公司昌吉供电公司, 中国·新疆 昌吉 831100

摘要

智能变电站在电网数字化转型及智能化升级中起到重要枢纽的作用, 变电站运维管理方式也发生重大变化, 已完成由传统周期性的定修模式转变成基于状态和风险的主动运维管理模式。通过对智能变电站运维整体框架、管理特点进行整理分析, 提出运营业务组织体系、运营业务工作流程、运营业务智能化特性等三大方面运维管理系统建设思路, 同时结合智能变电站运营业务发展现状以及线上巡视、运动诊断、运营业务数据汇聚与共享信息平台等相关技术深入剖析了运维管理系统的形成逻辑, 简述实现安全保障机制、风险预警管控、现场作业管控及应急处置等方法在运维安全管理方面的实际效果, 并给出可行性建议。

关键词

智能变电站; 运维管理; 在线监测; 智能巡检; 效能评价

1 引言

智能变电站是电网现代化的重要组成部分, 利用先进的传感技术、通信技术、信息处理技术和智能控制技术, 能够实现设备状态的感知、运行数据的实时采集、信息的共享以及协同决策等目标, 大幅提升电力系统供电可靠性和运维水平。但传统的变电站运维模式不能适应设备数量多、网架结构复杂、安全要求高所引起的问题, 无法满足数字化电网高效率、高安全、智能化管理的要求。智能变电站运维管理通过构建新的组织体系、制定一系列标准的运维流程、并结合相关关键技术开展应用等途径, 对运维的全过程实现可视

化的展现、量化的评价、可回溯性的追踪, 并建立以状态评估、远程诊断、风险预控和应急处置等为主的闭环管理系统, 让变电站运维实现从依靠经验向数据指导运维的转变, 推动电力系统安全稳定运行以及可持续发展。

2 智能变电站运维的整体框架与管理特点

2.1 智能变电站运维的组织体系与职责划分

智能变电站运维具有多层协同的组织体系特点, 调度、设备、信息、安监等专业管理部门都纳入统一运维管理平台统筹调配资源、协调工作任务, 结合跨部门跨专业优势开展运维工作^[1]。同时, 运维人员按岗位职责划分为状态监测、设备检修、信息管理、安全监督等模块化的工作单元, 形成“平台统筹、专业分工、数据驱动、责任到人”的组织体系架构。这种组织体系能够提高任务的准确派发以及工作开展情况的透明度, 有利于状态检修、远程诊断和应急抢修等重

【作者简介】张宗田(1991-), 男, 中国河南周口人, 本科, 工程师, 从事变电运维研究。

要工作快速做出决策和反应，有助于整个管理过程实现规范化、有据可查、可量化，同时在技术标准和安全规范同一直线过程中提升工作效率。

2.2 智能变电站运维工作流程与规范化管理

智能变电站的运维工作流程按照全生命周期管理，从设备投运 - 运行监测 - 状态评估 - 检修维护 - 风险防控 - 数据归档形成闭环管理；利用在线监测、智能巡检、远程诊断和数据分析等方式，结合设备状态感知、运维任务调度、缺陷管理以及检修计划等多维度要素进行关联，实现“数据采集—智能分析—任务派发—执行反馈—结果评价”的闭环作业方式；在流动生成性的基础上，形成运维各步骤的内容规范、节点的清晰可控、操作记录完整可视，并将作业票、监护制度、风险评估、应急演练等机制均嵌入信息化系统中去，使得运维全程可视化、每个节点均实现透明化以及过程都具备追溯性，最终避免发生人为差错或引起信息脱节的情况发生，进而使整个作业的质量得以保证，对于其中较为重要的节点与关键点来说，其安稳运行均有保障。

2.3 智能化环境下运维工作的新特征

运维具有实时感知、预测分析、远程协同、动态优化的特点，利用物联网、大数据、人工智能等技术手段开展运维管理工作，可实时掌握设备运行情况并做出故障报警提醒、预测设备寿命、提高运维工作的前瞻性与主动性^[2]。现场作业朝着智能巡检机器人、无人机巡检、AR 远程指导等多元化方式不断拓展，形成“少人值守、远程监控、集中决策、快速处置”格局；运维人员实现由原来单纯的操作型向数据分析型、决策支撑型、系统优化型转变，管理模式从原来的静态计划向动态优化转变，推动智能变电站运维向安全性、可靠性、经济性以及可持续发展的各方面综合提升。

3 智能变电站运维关键技术的应用分析

3.1 在线监测与状态评估技术的运用

在线监测、状态评估是国网昌吉供电公司智能变电站运检的核心，将大量多维多参状态量数据通过海量传感器实时汇集到主变、开关、母线、避雷器、GIS 等重要设备的在线监测装置，再通过先进的高速通信网络汇集至中心平台，基于在线监测的数据，结合设备状态评估模型和专家系统对设备健康度、故障概率和寿命周期进行全面的综合分析，并输出基于风险等级的检修策略，实现在线监测大数据驱动下的检修方式转变：由传统的按固定周期例行停电计划性的检修方式转变为按需要状态性和预测性的检修方式，以提高设备的可靠运行水平。

3.2 智能巡检与远程诊断技术的应用

国网昌吉供电公司探索多层协同模式，通过“少人值守”组合多维化视角，进行多频次巡检；变电站内巡检机器人可进行红外测温、局部放电、仪表读数、视频监控等工作，高压线路上巡检无人机可以进行可见光、红外双光巡检，实现

“少人值守”的全天候巡检全覆盖，巡检数据实时回传至远程诊断中心^[3]。通过图象识别，应用智能算法、专家规则等综合判别，并对发现的异常情况及时做出判断，并提出预警信息及处置意见下发到一线运维班组，实现巡检与运检业务高效联动，达到“少人值守”的目的。

3.3 运维数据集成与信息共享平台建设

国网昌吉供电公司通过建设运维统一的数据集成与信息共享平台，将在线监测、巡检、检修、调度、安监等多源异构的数据统一实行标准化、一体化融合，并通过该平台打破传统的“专业分割、系统孤立”壁垒，实现设备层—运维层—管理层的数据贯通、数据协同；采用云架构和大数据技术，实现数据采集、存储、建模、分析、展示为一体化集成服务，并集成了设备全生命周期健康档案管理、工单流转、风险预警、资源调配、绩效评价等功能模块。运维人员可以在工作站、移动终端以及大屏可视化界面获得实时的数据以及多维度的分析结论，做到风险可预判、趋势可掌握、决策可决策。如图 2-1 所示。

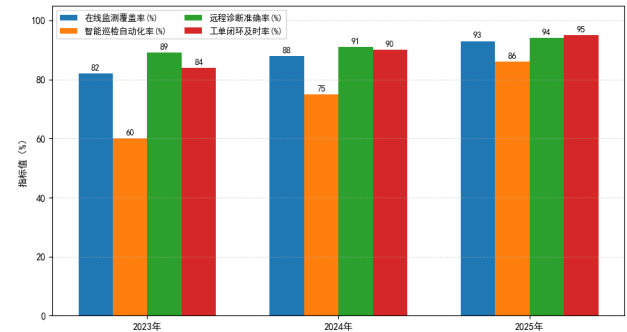


图 2-1 智能变电站运维关键技术应用成效对比

4 智能变电站运维安全管理与风险防控

4.1 安全风险识别与分级管理

国网昌吉供电公司构建以“全面识别、动态评估、分级管控”为核心的智能变电站运维安全管理体系，在系统运行过程中根据所涉及系统检测装置多种类信号数据信息源、智能巡检装置中采集信息、历史故障信息、作业票流转信息等进行全过程风险识别^[4]。采用数据挖掘与专家评估方法相结合的方式，搭建风险指标体系和风险矩阵模型，对风险发生的概率、风险的影响程度及风险可控性进行定量分析和分级管理，并将风险分为重大、较大、一般、可接受 4 个等级，匹配相应的风险防控手段。

4.2 运维现场作业安全控制要点

国网昌吉供电公司实施了智能变电站运维现场作业全过程的安全管控，实现风险预控与过程监督融合，即“人防 + 技防 + 智防”的一体防护模式”。

4.3 应急处置与快速恢复机制

国网昌吉供电公司把应急处置与快速恢复等作为智能变电站运维管理工作重点，对预案、资源调度、决策支持及

复盘改进全流程进行多层级、模块化管理,将所有预案资料,包括应急预案、资源调度方案、决策指令库以及复盘整改报告进行统一收集管理,汇总成完整的台账,并根据设备类型、风险等级、故障场景,针对各种故障场景,分别形成不同针对性预案:包括通信中断预案、设备故障预案、自然灾害预案、网络攻击预案,制定详细预案响应流程和标准化决策指令库。当故障时,监测系统可自动发现异常现象,推送告警信息,平台按照预案调度应急队伍、工器具、备品备件,远程专家会诊诊断分析的同时提供指导性建议,在线调用信息资源做出决策,并由运维员携带移动终端接收相应的工作任务和安全提示,及时发现故障原因并排除,在消除故障之后系统会自动生成一份关于此次事件的原因说明以及事后改进措施。

5 智能变电站运维效能提升与应用成效评估

5.1 运维效能量化评价指标体系

国网昌吉供电公司从智能变电站运维效能提升维度建立和完善包括安全、可靠、经济、可持续等方面在内的多维度量化评价指标体系,通过在线监测平台、智能运维平台实时获取各维度数据,并基于多指标多维度指数化综合分析模型、基于大数据分析的多指标综合加权法归一化与权重分配方法对所涉及指标进行归一化与权重分配,最后将获取的各项指标数据与相关兄弟单位开展部门内、行业内部的部门内横向对比、同一历史阶段纵向对比及行业内跨地域的 benchmark 对比。

5.2 典型应用实践与成效展示

对标国家电网公司智能化变电站建设技术成果,并结合昌吉供电公司试点应用情况,在 110 千伏昌吉供电站试点应用智能巡检、远程诊断、状态检修、数据集成平台等关键技术,开展了多项应用性研究,取得良好的应用效果^[9]。在线监测覆盖率达到 95% 以上,设备异常预警准确率达到 93%,降低全年计划检修工作量约 30%,运维工单闭环及时率达 96%,由于设备故障引起的非计划停电较上一年度下降了 40%,平均处置时间从以前的两小时降低到了现在的六十分之一小时以内。平台化数据集成有效实现跨专业工单协同流转,减少重复录入与人工审核,保障了工作透明以及资源利用率,依托运维绩效考核、风险闭环管控、故障案例库建立的应用典范经验在全公司推广应用,实现“试点验证—规模应用—持续迭代”的良性循环,助力区域电网安全稳定运行及供电可靠性的提升。如图 4-1 所示:

5.3 优化策略与持续改进方向

在国网昌吉供电公司总结前期智能变电站运维的经验基础上,提出了从技术、管理和机制三方面对运维水平持续改善优化、不断提档升级的想法和建议:一是加快引进更多

的自学习算法和预测性维护模型,提高设备状态感知深度、故障预测准确度;二是强化跨专业协同、知识图谱建设,从业务链中某个节点或者某个维度的优化升级转变为针对整条产业链的全过程重构,逐步实现由“数据驱动—决策智能—资源最优”的闭环运营;三是完善运维绩效激励机制、风险分级管控机制、改进反馈机制,形成以指标为牵引、以过程为监控、以结果为考核的一套动态调整机制。

表 4-1 国网昌吉供电公司智能变电站运维关键指标成效对比

指标项目	2022 年基线值	2024 年实际值	改进幅度
在线监测覆盖率 (%)	80	95	15%
设备异常预警准确率 (%)	85	93	8%
年度计划检修工作量 (工单)	1,200	840	-30%
运维工单闭环及时率 (%)	85	96	11%
非计划停电事件 (起/年)	20	12	-40%
平均故障处置时长 (小时)	3	1	-66%
巡检自动化率 (%)	60	86	26%
跨部门工单协同率 (%)	70	92	22%

6 结论

国网昌吉供电公司以智能变电站运评为基础,重构了组织体系,规范了工作流程,在线监测、智能巡检、远程诊断、数据集成等新技术深度融合,形成了以风险预控、状态评价、应急处置为核心的风险闭环管理,使运维从计划驱动到数据驱动、从被动响应到主动预防转变,多维度量化指标体系与典型案例的有机结合,是对其管理成效进行评价及持续优化的基础,充分实现提高设备健康度、供电可靠性、资源利用率的目的,大大降低安全风险及非计划停电率。算法自适应、知识图谱构建及绿色低碳化是未来发展方向,在此过程中,将进一步提高智能变电站运维的前瞻性、经济性和可持续性,为区域内电网高质量运行及行业智能化升级奠定坚实基础,打造形成具有代表性的可复制、可推广经验。

参考文献

- [1] 魏崇理,明廷焕,李士焜.110kV智能变电站智慧化技术改造分析[J].农村电工,2023,31(10):37.
- [2] 颜驰骋.智能变电站变电运维安全与设备维护探析[J].张江科技评论,2024,(05):140-142.
- [3] 杨帆,张冉,李楚涵.基于变电站二次系统的在线监测设计优化[J].标准科学,2024,(S1):193-199.
- [4] 张妍.智能变电站二次设备运维中的关键技术分析[J].集成电路应用,2024,41(10):304-305.
- [5] 杨浩,王飞鹏.智能变电站继电保护在线监测系统设计分析[J].科技与创新,2024,(21):62-64.