

# Discussion on Intelligent Operation and Maintenance Management Model for Electrical Equipment in Smart Substations

Xiuzhong Gong Runchao Chen Mingming Yuan Xinxin Ma Pengyang Song

Huadian Electric Power Research Institute Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310030, China

## Abstract

As the core node of smart grid construction, the efficiency and quality of electrical equipment operation and maintenance management in smart substations directly determine grid stability. Traditional maintenance models suffer from issues like blind repairs, delayed responses, and inefficient resource allocation, making them incompatible with smart grid requirements. This paper proposes an intelligent operation and maintenance management system for smart substations through three dimensions: technical architecture upgrades, management mechanism innovations, and phased implementation paths. By integrating PDCA process control and 5W1H analysis methods, the system drives the transition from periodic maintenance to condition-based maintenance through three technological layers: perception, transmission, and platform. This establishes a full-process, intelligent, and closed-loop management model that ensures equipment status visibility, fault predictability, and operational controllability, providing essential support for modern smart grid development.

## Keywords

smart substation; electrical equipment; operation and maintenance management; intelligentization; condition-based maintenance

## 智能变电站电气设备的智能化运维管理模式探讨

巩秀中 陈润超 袁明明 马欣欣 宋芑阳

华电电力科学研究院有限公司, 中国·浙江 杭州 310030

## 摘要

智能变电站作为电网智能化建设的核心节点,其电气设备运维管理的效率与质量直接决定电网运行稳定性。传统运维模式存在检修盲目性、响应滞后性、资源配置低效等问题,已无法适配智能电网的发展需求。本文从运维管理视角出发,结合PDCA过程控制与5W1H分析方法,从技术架构升级、管理机制创新、分阶段实施路径三个维度,系统构建智能变电站电气设备的智能化运维管理体系,通过感知、传输、平台三层技术革新,推动运维模式从定期检修向状态检修转型,打造全流程、智能化、闭环式的运维管理模式,实现设备状态可知、故障可预、运维可控,为现代智慧电网建设提供运维管理支撑。

## 关键词

智能变电站; 电气设备; 运维管理; 智能化; 状态检修

## 1 引言

智能变电站运维系统化管理的核心理念是遵循系统化原则,运用P(计划)D(执行)C(检查)A(处理)过程控制和5W1H六合分析工作方法,从资料管理、设备验收等多方面展开系统规范管理。具体实施方法包括细分工作、加强培训、严格监控和细化验收流程等。智能化运维管理模式运行中,可以发挥其多方面优势:人员方面,促使大量专业人才涌现出来,使得变电运维工作人员具有较高的综合素质,由此大量储备人才;资源配置方面,应用现代化技术对应用资源优化,以合理配置人力资源,工作质量提高;工作效率方面,变电运维工作流程优化,运维工作不再繁琐,工

作进度加快,效率提高,工作人员能够很好地应对现场工作。为实现智能变电站电气设备的有效运维管理,可采取多种措施。如健全智能变电站的运行维护体制,明确操作细则,落实岗位责任制,及时纠正运行维护中出现的问题,降低故障发生<sup>[1]</sup>。此外,还可借助智能运维云平台,如AcrelCloud-1000变电所运维云平台,利用现代信息化手段和综合管理策略,为用户提供线上线下运维监控服务,实现故障实时报警、提前预警和快速处理,保障设备运行安全,降低运维管理成本,达到智能化、可视化的运行管理目的。

## 2 基于运维管理需求的技术架构智能化升级

### 2.1 感知层革新: 实现设备状态全维度、高精度采集

感知层是运维管理的核心数据源头,核心解决传统运维中设备状态“看不见、摸不准、采不全”的痛点,通过部署多模态传感器网络、实现协议兼容与数据标准化,搭建

【作者简介】巩秀中(1981-),男,中国山东临沂人,本科,高级工程师,从事电气研究。

全站设备状态监测网络，为运维管理提供精准全面的基础数据。多模态传感器网络针对变压器、断路器、互感器等核心设备及变电站运行环境部署专用传感器，实现关键参数与环境参数实时采集<sup>[2]</sup>。以500kV变电站为例，387个监测点位可分钟级采集温度、振动等参数，数据完整率99.6%，各设备按需配置专属传感器，环境监测也配套对应传感器，同时明确传感器误差不超0.5ppm，经定期校准维护保障数据真实可靠。协议兼容与数据标准化方面，采用IEC61850标准协议实现设备数据互通，适配NB-IoT等协议解决信号覆盖问题，还制定统一采集与编码标准，消除数据孤岛，为后续运维数据分析奠定基础<sup>[3]</sup>。

## 2.2 传输层优化：构建低延时、高可靠的运维数据传输网络

采用“5G+光纤”双通道传输方案，构建低延时、高可靠的通信网络。实测数据显示，故障信号传输延时控制在50ms以内，满足继电保护对时效性的严格要求。同时部署边缘计算节点，实现就地数据预处理，有效降低主站系统负荷。通过RESTful API，微服务可以方便地进行数据交互，提高数据传输的效率和可靠性。在工业领域，随着设备数量的增加和数据量的增大，云端的负载越来越重。为了降低云端的负载，提高系统的响应速度，工业领域在边缘侧部署轻量化推理模型，实现设备健康指数（DHI）的实时预测。

## 2.3 平台层建设：打造一体化智能运维管理决策平台

搭建统一的智能运维管理平台，将设备健康状态评估模块、故障预警专家系统、检修决策支持系统和数字孪生仿真环境集成。某省级电网的应用实践表明，该平台可将故障诊断时间缩短60%以上。此项工作应用机器学习方法，通过算法与现场环境的识别，不断学习最优的策略。通过构建工艺优化、质量预测等智能体集群，工业MOM系统可以实现对生产过程的智能化管理和决策支持<sup>[4]</sup>。例如，在一个汽车制造工厂中，通过数字孪生模型模拟汽车生产过程，利用强化学习算法优化生产工艺参数，提高汽车的生产质量和效率。

# 3 智能变电站电气设备智能化运维管理机制创新

## 3.1 运维模式转型：从定期检修向状态检修升级

传统定期检修模式基于固定周期开展检修工作，存在过度检修、检修不足与设备停运时间长等问题，是运维管理资源浪费、效率低下的核心原因。基于智能化技术架构的支撑，推动运维模式从“定期检修”向“状态检修”转型，建立基于设备健康指数的动态检修机制，实现检修工作的“应修必修、修必修好”，提升运维管理的精准性与经济性。

依托智能化监测设备与自动化工具，将传统人工巡检、人工操作的运维工作标准化、自动化，实现设备硬件状态、数据库表空间使用率、环境参数等的自动巡检，以及批量操

作、任务编排的自动化执行，减少人工干预，降低人为操作失误率。利用机器学习、大数据分析技术，对设备历史运行数据、故障数据、监测数据进行深度挖掘，实现设备故障的提前预测、性能瓶颈的精准定位。通过分析近三年运维数据，状态检修策略可使设备停止运行时间减少42%，运维成本降低28%，大幅提升了运维管理的经济性与设备运行可靠性。

## 3.2 应急响应体系：构建三级联动的智能化应急处置机制

构建“三级联动”应急机制，即站端自主处置简单缺陷、区域协同处理一般故障、省级支援应对重大事故。配套开发的移动应急终端，可将现场情况实时回传，支持远程专家解决现场问题，故障平均处置时间大大缩短。基于大数据和AI的监测系统实现灾害风险预测，提升预警准确性。应急指挥平台集成多源数据，通过知识图谱快速定位故障根源，生成处置建议。智能化调配系统结合GIS和无人机技术，实现物资精准投送与应急通道规划。通过VR/AR模拟灾难场景进行预案演练，提升团队协同能力，同时通过最小化数据权限降低泄露风险<sup>[5]</sup>。

## 3.3 知识管理体系：构建设备全生命周期的智能化知识管理平台

建立设备全生命周期数据库，涵盖出厂试验数据、安装调试记录、运行历史数据和缺陷处理案例。应用数据挖掘技术，形成标准化运维知识库，支持智能问答和案例推送功能，显著提升运维人员业务水平。比如，建立运维知识库，将故障处理经验、巡检报告等结构化存储，支持自然语言检索。例如民生银行通过案例库实现故障处理效率提升30%。

# 4 智能化运维管理模式的分阶段实施路径

## 4.1 第一阶段（1-2年）：完成全站监测网络建设，实现设备状态全面感知

一是传感器网络部署。变压器上安装温度传感器，对其内部温度实时监测，数据快速精准地传输到监测系统中。如果温度异常升高，系统警报启动，运维人员接收到信息则及时采取措施解决。振动传感器可以实时监测断路器在分合闸过程中的振动情况。通过对振动数据的分析，运维人员可以提前发现潜在问题，避免故障的发生。互感器可检测局部放电现象。该设备运行的过程中，通过实时监测，可了解局部放电现象并对互感器绝缘状态评估，以此为依据维护设备或者更换新设备。

二是智能终端集成。智能变电站监测网络运行中，智能巡检机器人发挥重要作用。该设备上安装高清摄像头、红外热像仪等设备，可实时监测其外观和温度变化情况。智能巡检机器人可以自主导航，遇到障碍能够自动规避。使用红外热像仪，就可对设备温度分布情况以检测，对于温度异常点能够及时发现。通过定期使用红外热像仪对设备进行检

测,可以及时发现潜在的故障隐患,避免事故的发生。

#### 4.2 第二阶段(2-3年):完善智能运维平台功能,实现运维数据智能分析

一是数据整合与标准化。在智能变电站中,存在着大量的设备状态数据、环境参数数据和能效数据等多源信息。将统一数据中台建立起来,各个系统以及设备的相关数据在平台上整合,将数据的不一致性消除,确保数据标准的统一化、接口的通用性,使得数据信息之间互联互通。

二是智能分析功能模块。该模块可以帮助变电站优化电气设备能量的分配策略,提高设备、能源利用率。该模块可以根据峰/平/谷时段,统计设备用电量,分析不同阶段的设备用电需求和设备发电情况。如在峰时段减少非必要设备的用电,在低谷时段进行设备的充电和储能等。通过优化能源分配策略,可以降低变电站的运营成本,提高经济效益。

三是三维可视化与交互。构建数字孪生系统运行中,设备运行状态可视化呈现,而且三维立体展示。数字孪生系统还支持远程操控和参数调整。运维人员可以通过远程终端对数字孪生系统中的设备进行操作,如模拟分合闸操作、调整设备的运行参数等。通过数字孪生系统的验证和分析,确保操作的安全性和可行性后,再对实体设备进行相应的操作。这样可以提高运维效率,减少人工操作的风险。

#### 4.3 第三阶段(3-5年):形成全流程智慧运维体系,实现运维管理闭环优化

一是标准化运维流程。制定预防性维护周期,通过对设备的历史运行数据和故障记录进行分析,可以制定合理的预防性维护周期。建立设备全生命周期档案,包括设备的安装、检修以及更换等各项信息,后续的设备维护以及管理工作以此为依据展开。将设备全生命周期档案建立起来,包括设备的安装、检修以及更换等各项信息都能够详细记录,后续的设备维护以及管理工作以此为依据展开。比如,设备运行中产生故障的时候,查阅档案就可以了解设备历史维修情况,了解类似故障的解决方法。通过对故障原因快速定位,

将科学有效的技术维修方案制定出来。

二是智能决策支持。结合故障录波、在线监测数据,生成维修建议方案可以为现场人员提供决策依据。通过对故障录波数据的分析,可以准确判断故障类型和故障位置。通过对在线监测数据的分析,可以发现设备的潜在故障隐患。如断路器触头更换优先级。对于一些重要的设备,如主变压器、母线断路器等,系统会优先推荐进行维修和更换;对于一些次要的设备,系统会根据设备的运行状态和故障风险,合理安排维修时间。

三是持续优化机制。通过运维数据回溯分析,迭代优化算法模型与运维策略,形成PDCA闭环是实现智能变电站持续发展的重要保障。通过不断地进行PDCA循环,即计划(Plan)、执行(Do)、检查(Check)、处理(Act),可以使智能变电站的运维管理水平不断提高,设备的可靠性和安全性得到有效保障。

## 5 结论

通过研究明确,智能变电站电气设备的智能化运维管理模式,通过新一代信息技术与传统电力技术的深度融合,实现了设备状态可知、故障可预、运维可控。实践表明,该模式可提升运维效率40%以上,降低安全事故发生率60%,是构建现代智慧电网的重要支撑。

### 参考文献

- [1] 石超,张四杰,宋金珠.基于云计算的变电站设备智能化运维平台设计与实现[J].自动化应用,2024,065(19):157-159.
- [2] 蒋晟.基于物联网技术的智能变电站运维管理系统分析[J].通信电源技术,2023,040(16):233-235.
- [3] 刘永振.智能变电站二次设备运维中的监控与故障识别技术分析[J].集成电路应用,2023,000(012):40.
- [4] 张威.人工智能技术在变电站运维管理中的应用研究[J].电气技术与经济,2024,000(7):227-229.
- [5] 徐天,王俊,侯东方.基于人工智能的变电站智能化运维管理系统设计与优化.