

# Intelligent monitoring and fault diagnosis in power system substation operation and maintenance

Haotian Cui<sup>1</sup> Shuaizhao Wen<sup>2</sup>

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

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

## Abstract

With the continuous development of power systems, substation operations are evolving towards large-scale, automated, and information-driven approaches. Traditional dispatch management and equipment operation models can no longer meet the operational demands of power networks characterized by high loads, complex topologies, and diverse energy integration. In this context, the application of intelligent technologies enables substation management tasks—including condition monitoring, fault diagnosis, predictive maintenance, and prevention—progressing from manual supervision to integrated intelligent decision-making. This transformation promotes a more scientific and precise operational management model for substation systems. Drawing from China's practical experience in power system substation operations, this article first elaborates on intelligent technologies and their application value in substation management. Subsequently, it explores key implementation aspects of these technologies, aiming to provide practical references for advancing intelligent substation operations in power systems.

## Keywords

intelligent technology; power system; substation operation; application; value

## 智能化技术在电力系统变电运行中的应用

崔浩天<sup>1</sup> 温帅召<sup>2</sup>

1. 国网冀北电力有限公司唐山供电公司, 中国·河北 唐山 063000

2. 国网冀北电力有限公司廊坊供电公司, 中国·河北 廊坊 065000

## 摘要

随着电力系统的不断发展, 变电站运行逐步向规模化、自动化、信息化方向发展, 以往的调度管理以及设备运行模式已经不能够满足电力网络高负荷、复杂拓扑与多种能源接入的运行情况。在这种背景下, 通过将智能化技术应用可以使得变电站运行管理中状态监测、故障诊断、故障预测和预防性维护等工作由传统人工监管朝着综合智能决策方向发展, 从而推动整个变电站运行管理模式变得更为科学精准。有鉴于此, 文章从我国电力系统变电运行实践出发, 首先就智能化技术及其在变电运行中应用价值展开阐述, 随后就其一些关键应用要点进行探讨, 希望能够为推动电力系统变电智能化运行提供一定实践参考。

## 关键词

智能化技术; 电力系统; 变电运行; 应用; 价值

## 1 引言

近年来, 随着智能化技术的飞速发展, 其在电力系统中的应用日益广泛。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》明确提出, 要加快智慧电网建设, 推动电网数字化与智能化。变电站作为电网的关键节点, 其运行的智能化水平直接关系电网的安全稳定运行。基于此, 下文将围绕智能化技术在电力系统变电运行中的应用提出几点看法, 以供参考。

## 2 智能化技术概述

电力系统变电运行的智能化技术是指利用现代信息技术、智能硬件和软件等技术手段, 对电力系统中的变电设备和运行过程进行智能化管理和优化控制的技术系统。这种技术通过数据采集、分析和处理, 实现对电力系统变电设备的状态监测、故障诊断、故障预测和预防性维护, 提高了电力系统的运行效率、可靠性和安全性<sup>[1]</sup>。基于运行设备状态量、工况参数及外部扰动信息的多维感知, 应用多项智能化技术实现对变电设备工况的动态刻画及自适应调整。常用的智能化技术涉及面向实时状态监测的传感器网络、设备运行异常的人工智能算法、基于故障预测的大数据分析以及预防性维护的智能维护平台等。相较传统运行模式, 智能化具有高时

【作者简介】崔浩天(1995-), 男, 中国河北保定人, 硕士, 工程师, 从事变电运行研究。

效、全网覆盖、多源信息融合等众多优点，在日益复杂电力系统下能够主动对运行工况实施管控，对变电运行实现数字化、精细化、自适应管理的提供强有力的技术支持。

### 3 智能化技术在电力系统变电运行中的应用价值

在现今复杂的电力系统运行环境条件下，智能化技术的应用赋予变电运行面向全局、多维的支持。一方面，变电运行实时感知上，分布式智能终端和在线监测设备可以对变电站电压、电流、温度、局部放电以及油色谱等重要参数进行高频采集并通过边缘计算单元实现高速运算处理，这使人工巡检的比例大幅度降低；另一方面，变电运行数据管理上，智能化技术的应用可对电力二次设备、自动化平台和调度控制中心的数据来源进行汇集融合后建立起统一的数据池，以此作为变电站运行异常工况辨识、发展趋势研判的基础。此外，故障处置和事故抢修方面，智能化技术可通过大数据分析 with 智能维护平台能够快速制定出解决方案，缩短决策时间以及减少误判的概率。同时得益于智能维护平台的应用有助于发现变电运行早期隐患失效风险，由原来的被动维修变为提前主动维护以预防设备性能恶化。总的来说，智能化技术在变电运行领域的应用，不但能够帮助提升实时感知精度与增强数据管理能力，同时还可以优化故障处置过程以及实现前移维护策略，最终促使电力系统变电运行实现更为高效、安全以及可靠的目标。

## 4 智能化技术在电力系统变电运行中的应用要点

### 4.1 基于传感器网络的状态监测

电力系统变电运行中，基于传感器网络的状态监测已逐步形成覆盖全面、响应快速的分层体系，其核心在于传感器布设策略与多源数据融合的深度结合。在变压器绕组及铁芯部位，常采用分布式光纤布拉格光栅温度传感器进行点位与区间温升的实时监测，并结合油中溶解气体在线色谱传感器，实现热缺陷与绝缘老化的协同识别；在断路器机械特性监测中，布设高频加速度传感器与电流互感式接触电阻传感器，对合闸与分闸过程中触头振动信号及导电路径阻抗进行同步采集，以建立机械磨损与电气接触劣化的动态模型；在隔离开关及电抗器运行环节，则通过超声波局放传感器与特高频传感器联合布点，针对绝缘子串表面沿面放电及线圈内部绝缘击穿开展局部放电定位，并通过时域波形与频域特征比对实现缺陷源区间的精确划分<sup>[2]</sup>。上述采集信号经边缘计算节点完成噪声抑制、特征向量提取及初步模式识别，随后以 IEC 61850 标准化通信协议传输至调度中心监控平台，在平台内由多维特征融合算法构建多参数耦合模型，将油温梯度、放电幅值谱、接触电阻变化率与振动冲击响应进行关联解析，从而形成对设备健康状态的全景化表征。在应用层面，该监测网络支持亚秒级数据上传与毫秒级本地告警机制，使

异常升温、早期局放及触头卡涩等隐患能够在萌发阶段得到识别，同时通过历史数据库构建基于时间序列的退化趋势模型，进而为运行工况调节与检修计划优化提供实时依据。

### 4.2 基于人工智能算法的故障诊断

针对智能化技术在电力系统变电运行故障诊断中的应用，基于人工智能算法目前正逐渐形成了系统化的技术路线，其关键是对多源运行数据进行深层次特征提取与快速分类，具体为：变电运行中局部放电、红外测温 and 振动检测等方面，可借助于卷积神经网络对图谱纹理、红外热点、振动信号的频域特征进行多尺度卷积建模，并利用深度信念网络完成模式抽象建模以及非线性映射构建，从而达到对不同放电类型的细粒度分类、热点坐标定位或者机械缺陷特征的精准判别。对于断路器操动录波、母线短路过电压波形、事故全波记录等非结构化数据处理方面，以小波包分解、短时傅里叶变换为工具，对信号时频能量特性进行重构以获得多维度的能量谱特征，接着结合集成学习算法构建判别器，最终实现高噪声环境下异态工况的精准判别与分类，从而保证诊断稳定性和适应性。出于满足变电站快速处置的要求，可将人工智能诊断模型部署于边缘计算装置上，如此一来凭借轻量化深度网络和张量推理引擎实现秒级的本地运算，从而对断路器拒动、变压器绕组匝间短路、母线接地故障等发生的第一时间就可以得出判定结果，之后再由站控层向调度主站上传报文信息实现事态的即时联动响应<sup>[3]</sup>。另外，人工智能算法中所包含的变电运行专家规则库、案例数据库可通过运用强化学习和迁移学习对它们参数进行动态调整实现故障诊断模型不断迭代新的判别边界，这样一来针对新出现的故障特征能够达到快速学习并适应的目的。最后，人工智能算法和变电运行历史案例开展交叉验证及多源数据残差校核有助于降低故障诊断平台误报和漏报的概率，从而使诊断结果具有可靠性、一致性的保障，最终辅助运维人员和调度层做出正确的决策支撑。

### 4.3 基于大数据分析的故障预测

在电力系统变电运行中，基于大数据分析的故障预测核心在于建立起覆盖全生命周期的运行数据体系，从而达到对设备状态的量化建模及趋势推演。在数据采集层面应包括负荷曲线、局部温升分布、绝缘油色谱特征、局放监测结果以及历次绝缘试验记录等变电设备运行数据，随后以统一数据接口接入调度自动化系统和在线监测平台，以构建时序化、分层化的设备运行数据库。借助于该数据库一方面能够保存过去所有的变电运行历史数据，另一方面可实现实时数据的高速写入和异常数据的预处理，从而给变电运行故障预测提供数据支撑。在数据分析层面，采用时间序列建模及多元耦合建模的方法来对变电设备非线性的退化趋势做描述拟合，该过程中可选择利用向量自回归模型、递归神经网络或长短时记忆网络对于这个趋势做拟合设计<sup>[4]</sup>。构建模型的过程中应该将外界气温的季节性变动或者湿度水平、外接短

时冲击负荷等这些因素考虑进去,随后以特征加权与正则化技术去将外界的环境噪声给剔除掉。预测应用层面,基于变电运行中关键设备开展定量评价。例如大型变压器绕组绝缘的老化速率开展分段回归拟合-寿命阈值判定;基于磨损参数动态演化模型开展断路器分合闸机械特性的评价;通过它们捕获难以发现的隐性性能衰减信号。预测结果可通过健康指数曲线、风险矩阵以及多维可视化面板等方式展示,形成对比直观的趋势图谱,以供运维人员参考。另外,由于数据分布在长时间运行以及环境条件变化下会发生漂移现象,故障预测应具备自适应迭代机制,即利用递增学习方式以及滑动时间窗算法不断校准变电运行大数据分析故障预测模型的参数,如此一来确保模型长期保持良好有效性和稳定性,从而使预测结果得以准确反映出变电设备当前的真实运行状态,并且也可及时发现潜在的故障开展预防性维护工作。

#### 4.4 基于智能维护平台的预防性维护

电力系统变电运行实践过程中,基于智能维护平台开展的预防性维护目前已经形成了以数据为驱动及智能推理为核心的模式。智能维护平台利用多维在线监测数据支持下准确掌握变电设备运行状态,包括变压器油色谱、局部放电图谱、红外热像、开关动作波形等多源异构数据,随后以数据清洗和特征归一化构建变电运行设备状态数据库,以使各维护分析中输入参数一致。接着再引入贝叶斯推断、马尔可夫决策过程的设备健康评估模型,结合实时状态指标和历史劣化轨迹动态生成变电设备健康指数曲线,并据此作为平台触发预防性维护的逻辑判断依据。智能维护平台内置基于约束优化、遗传算法等的维护调度模块,随后结合变电设备健康指数、电网负荷预测和运行方式调整自动生成最优检修计划。该过程中除对变电站内的关键设备分层设置维护优先级外,同时还考虑了区域电网拓扑、备用容量等因素,从而确保所生成检修计划的检修窗口匹配电网调度。同时,充分利用智能维护平台工单闭环管理机制,配合RFID标识、移动终端和云端数据库对变电设备开展预防性维护的全程跟踪,

并实时对执行期间的工时、操作参数以及质检记录进行数据采集,随后借助于边缘计算节点开展现场数据的即时校验工作,从而防止预防性维护时信息遗漏或记录信息不真实等问题出现<sup>[5]</sup>。另外,可在智能维护平台的底层集成知识图谱和推理引擎生产针对典型变电设备故障模式的精准维护方案,如平台判别主变绕组绝缘老化达到临界点的时候,自动生成真空干燥或者油处理的预防性维护指令,并对接相应的安全规范和技术标准要求,接着在调度计划环节中锁定维护窗口时间,从而把预测结果和维护执行环节无缝衔接,有效提升平台预测分析与诊断维护的应用水平。

## 5 结语

综上所述,电力系统的变电运行中,智能化技术凭借着自身众多优点正得到了日益广泛的应用,借助于在状态监测、故障诊断、故障预测和预防性维修等环节的具体应用,该技术可建立从设备开始至结束的全生命周期的运行支撑体系,助力运行管理科学化、精细化,最终实现高效安全稳定的电力系统变电运行目的。未来,随着信息化技术手段不断更新、智能化平台更新迭代以及算法模型持续进化,智能化技术面对变电运行中高负荷运行、复杂工况适应及多源数据融合下处理能力将进一步提升,从而为电力系统的稳定运行提供更为坚实的技术保障。

### 参考文献

- [1] 薛博水.变电站智能化在变电运行中的应用与发展研究[J].电力系统装备,2020(21):2.
- [2] 杨春霞.电力系统变电运行潜在问题与防范方法研究[J].中国科技期刊数据库 工业A,2022(2):4.
- [3] 韩东升,徐玉谦,张振伟.电力系统变电运行的智能化技术分析[J].百科论坛电子杂志,2019.
- [4] 张浪浪.电力系统变电运行的智能化技术分析[J].数字化用户,2024(38).
- [5] 张志杰.变电运行设备的自动化技术与维护工作分析[J].城市建设理论研究(电子版),2016.