

Application Analysis of Intelligent Early Warning Systems in Substation Operation and Maintenance

Liming Ding Zongtian Zhang Feiya Ma Jia Ma

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

Abstract

As power grids expand and the demand for intelligent transformation becomes increasingly urgent, traditional substation operation and maintenance models face challenges in real-time performance and accuracy. Intelligent early warning systems, with their proactive prediction capabilities, have emerged as key technologies for enhancing operational standards. This paper aims to systematically analyze the specific application modes, implementation effects, and optimization paths of these systems in substation operation and maintenance. Based on the theoretical framework of intelligent early warning systems and combined with their key supporting technologies, the study delves into practical application scenarios such as substation equipment condition monitoring and system operational safety, and evaluates the resulting improvements in operational efficiency and reliability. The analysis indicates that intelligent early warning systems can effectively achieve early fault diagnosis and risk prevention, significantly reducing operational costs and accident risks. However, challenges remain in data quality, algorithm adaptability, and talent reserves. Future efforts need to further integrate advanced sensing technologies and artificial intelligence algorithms to promote the continuous development of substation operation and maintenance towards digitalization and intelligence.

Keywords

Intelligent Early Warning System; Substation Operation and Maintenance; Condition Monitoring; Fault Prediction; Big Data Analysis

智能预警系统在变电运维中的应用分析

丁立明 张宗田 马菲雅 马佳

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

随着电网规模扩大且智能化转型需求日益迫切,传统变电运维模式在实时性与准确性方面面临挑战,而凭借主动预测能力成为提升运维水平关键技术的智能预警系统,本文旨在系统分析其在变电运维中的具体应用模式、实施效果及优化路径。基于智能预警系统理论框架并结合其关键技术支撑,深入探讨在变电设备状态监测与系统运行安全等方面实际应用场景且评估带来的运维效率与可靠性提升效果。分析表明,智能预警系统能有效实现故障早期诊断与风险防控、显著降低运维成本与事故风险,却同时在数据质量、算法适应性及人才储备方面存在挑战。未来需进一步融合先进感知技术与人工智能算法以推动变电运维向数字化、智能化方向持续发展。

关键词

智能预警系统; 变电运维; 状态监测; 故障预测; 大数据分析

1 引言

随着电力系统规模持续扩大且负荷密度不断增加,依赖定期检修与人工巡检的传统变电运维模式,因具有滞后性与被动性而难以适应高可靠性供电的现代需求,致使设备隐患无法实时感知、故障征兆难以提前识别、运维决策缺乏数据支撑等问题日益凸显,让电网安全运行面临潜在风险。近年来物联网传感技术、大数据分析及人工智能算法取得显著进展,为变电站状态感知与智能分析提供强大技术支撑。作为数字化转型关键载体的智能预警系统,通过集成多源数据

与智能模型,实现对变电设备运行状态的实时监测、异常行为的早期识别以及故障风险的超前预测,促使运维工作从事后处置向事前预警、从计划检修向状态检修演进,成为提升变电运维精益化水平与本质安全能力的重要路径。

2 智能预警系统的理论基础与关键技术

2.1 系统概念与功能特点

智能预警系统是一种基于数据驱动与智能算法的自动化监控体系,其核心在于利用多源感知数据与计算模型实现对变电设备运行状态的实时评估与异常预警。该系统不仅具备传统监测系统的数据采集功能,更关键的是集成了故障预测与诊断能力,能够从海量历史数据与实时数据中挖掘潜在规律,识别设备性能的退化趋势与突发异常。在变电运维场

【作者简介】丁立明(1990-),男,中国甘肃白银人,本科,工程师,从事变电运维研究。

景中，智能预警系统主要针对变压器、断路器、隔离开关等关键设备^[1]。

2.2 关键技术支持

智能预警系统的实现依赖于多项关键技术的协同支撑，物联网传感技术是系统感知物理世界的基础，其在变电站内广泛部署的温度、湿度、油色谱、特高频局放、振动加速度等传感器，构成了设备状态感知的神经末梢。这些传感器需具备高精度、长期稳定性与抗电磁干扰能力，其采样频率与数据质量直接决定了预警的及时性与准确性^[1]。大数据分析技术负责处理传感器产生的海量异构数据，包括数据清洗、特征提取与关联分析等环节。数据清洗环节需解决传感器漂移、通信中断导致的数据缺失与异常值问题，其公式如下，

$$T = \mu + k\sigma$$

其中， T 代表动态预警阈值， μ 表示该参数在正常状态下的历史数据平均值， σ 为其标准差，用于度量数据的离散程度， k 是一个根据误报率容忍度与安全性要求设定的调整

系数，通常取值范围在 2 至 3 之间。该公式的物理意义在于，当实时监测数据超过均值一定倍数的标准差范围时，即认为设备运行状态出现显著偏离，从而触发预警。

2.3 系统架构与工作流程

智能预警系统通常采用分层分布式架构，逻辑上可划分为数据采集层、网络通信层、数据平台层、智能分析层与应用展示层。数据采集层由部署在一次设备与二次系统上的各类智能传感器与监测单元构成，负责将模拟量物理信号转换为标准化的数字信号。网络通信层依托变电站内部工业以太网或无线专网，采用规约转换与边缘计算网关，实现采集数据的可靠汇聚与初步封装，确保数据低延时、高可靠上传^[2]。数据平台层是系统的数据中枢，负责接收、存储与管理来自全站的异构时序数据，并提供数据查询、订阅与接口服务，该层通常部署时序数据库与关系型数据库以满足不同数据的存储需求，智能预警系统架构如图 1 所示。

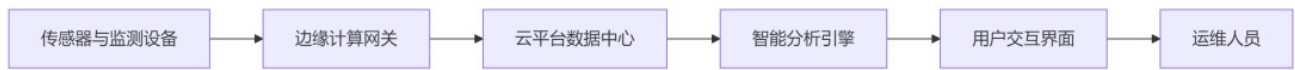


图 1 智能预警系统架构图

3 智能预警系统在变电运维中的具体应用

3.1 设备状态预警应用

智能预警系统在变电设备状态深度感知与故障早期识别方面发挥着决定性作用，以油浸式电力变压器这一核心设备为例，其预警机制已从单一气体含量超限判断演进为基于多维信息融合的故障演化过程动态追踪。系统通过高精度油色谱在线监测单元，持续追踪氢气、乙炔、乙烯、甲烷、乙

烷等特征气体的产气速率而非仅仅关注绝对含量^[2]。当监测到乙炔含量在 48 小时内从 3 μ L/L 升至 12 μ L/L 且总烃产气速率超过 0.5mL/h，同时超高频局部放电监测显示信号有效值增长 20% 且相位分辨谱图呈现典型的悬浮电位放电特征，而铁芯接地电流监测值从 80mA 跃升至 350mA 时，智能诊断引擎会立即启动多物理场耦合分析，变电设备智能预警关键指标与故障映射关系如表 1 所示。

表 1 变电设备智能预警关键指标与故障映射关系

设备类型	监测参量	监测技术	预警阈值	预警等级	映射的典型故障模式	系统响应动作
油浸式变压器	乙炔 C2H2 含量	在线色谱分析	> 5 μ L/L 且 48 小时产气速率 > 2 μ L/d	注意	电弧放电	增加采样频次至 2 小时一次
	乙炔 / 乙烯比值	特征气体比值分析	> 0.1 且总烃 > 150 μ L/L	预警	油中低能放电	启动局部放电定位监测
	铁芯接地电流	穿芯式电流传感器	> 300mA 且含高频谐波	严重	铁芯多点接地	建议 72 小时内停电检查
高压断路器	分闸时间	位移传感器与计时器	较基准值偏差 > 1.8ms	预警	操动机构卡涩	检查操作机构润滑情况
	振动信号能量熵	高频振动加速度计	特征向量欧式距离 > 0.35	预警	缓冲器性能劣化	下次检修时更换液压油
GIS 设备	SF6 气体微水含量	露点传感器	> 450 μ L/L	预警	吸附剂饱和	安排气体处理
	特高频信号幅值	UHF 传感器阵列	> 50dBm 且 PRPD 谱图呈表面放电	严重	盆式绝缘子污秽	启动紫外电晕检测确认

3.2 系统运行预警应用

在电网系统运行维度，智能预警系统构建了从变电站到区域电网的立体化安全防护体系。系统通过站内 PMU 以 100 帧 / 秒的速率采集母线电压相量、线路有功及无功功率，结合调度中心下发的拓扑模型，实时计算站内关键断面的 N-1 静态安全裕度。当进行方式倒闸操作时，系统能在线进

行潮流计算仿真，若发现某条 110kV 线路跳闸将导致主变负载率瞬时超过 130%，则立即发出“过载风险”预警，并自动生成最优负荷转移方案，例如建议合上母联开关并将部分负荷转移至另一台容量充裕的主变。对于暂态稳定问题，系统利用 WAMS 平台提供的广域测量数据，基于李雅普诺夫直接法实时计算系统的暂态能量函数^[3]。

4 应用效果、挑战与优化路径

4.1 实施成效分析

智能预警系统在变电运维领域的规模化应用已产生显著的经济效益与安全效益,以国网某省级公司2023年的实践为例,在其管辖的500座110kV及以上变电站部署智能预警平台后,变电主设备的非计划停运次数从年均28次下降至9次,降幅高达67.9%。这一成效直接源于对潜伏性故障的早期干预,例如系统通过油色谱趋势分析成功预警了一台220kV主变的内部过热故障,该故障由分接开关触头接触电阻增大引起,在故障发展初期即被识别,避免了一次可能导致持续一周的停电事故及约200万元的设备修复成本^[3]。在运维效率方面,传统的定期检修模式导致大量过度维修,智能预警系统推动的状态检修使预防性试验和维修工作量减少了约35%,运维人员得以将精力聚焦于高风险设备。某换流站应用断路器机械特性预警模型后,将检修周期从固定的3000次操作延长至基于实际状态的个性化周期,平均延长了40%的运行时间,节省了大量备品备件及人力成本。在安全提升上,系统实现了对绝缘劣化、机械卡涩等隐性缺陷的分钟级至秒级响应,将故障发现时间从平均14天压缩至3小时以内,使得运维人员能够在外绝缘闪穿、开关拒动等严重事故爆发前完成隔离与处理,近三年来成功避免了17起可能引发电网震荡的二级以上设备事件。这些成效表明智能预警系统不仅是技术工具升级,更是变电运维管理模式的一场深刻变革。

4.2 面临的主要挑战

尽管智能预警系统展现出巨大潜力,其在工程化落地过程中仍面临一系列严峻挑战。数据质量是首要瓶颈,变电站现场环境复杂,传感器长期运行易发生漂移,通信干扰导致数据包丢失率在无线传输场景下可达5%,而油色谱监测装置在不同湿度温度下测量值存在显著差异,这些噪声数据直接污染了训练样本,导致模型泛化能力下降。数据孤岛现象同样突出,在线监测、生产管理、雷电定位等系统相互独立,数据格式与传输规约不一,缺乏统一的信息模型,使得多源数据融合分析困难重重。算法适应性是另一大难题,多数智能算法基于理想数据假设开发,而变电站设备型号繁杂、运行工况动态变化,在A站训练准确的变压器故障诊断模型,迁移至B站因负荷特性、绝缘老化程度不同,准确率可能下降超过20%。缺乏足够的高质量故障样本尤其是有标签的故障样本,制约了监督学习模型的性能,而无监督学习模型又存在误报率高、根因解释性差的缺点^[4]。

4.3 优化方向建议

为应对当前挑战,未来智能预警系统的发展需从数据、算法、人才、技术四方面协同推进。数据层面应致力于构建

高质量的变电设备全景信息模型,通过制定统一的数据接入规范与标准化的信息交互接口,打通在线监测、视频监控、机器人巡检、管理信息等系统壁垒,利用数据清洗、对抗生成网络等技术扩充故障样本库,为模型训练提供纯净、完备的数据燃料。算法模型优化是核心,需大力发展小样本学习与迁移学习技术,使模型能够利用少量新站数据快速适应特定运行环境,提升泛化能力。同时引入物理信息神经网络,将设备绝缘老化、热传导等物理规律作为约束嵌入深度学习模型,增强预警结果的可解释性与可靠性,例如将变压器热模型与LSTM网络结合,实现既符合物理原理又具备学习能力的顶层油温预测。在人才队伍建设上,电力企业需与高校、科研机构深化合作,定制培养既懂电力技术又通晓人工智能的复合型人才,并建立常态化的培训机制,通过虚实结合的数字孪生平台为运维人员提供故障模拟、预警研判、应急处置的沉浸式培训,提升其应对智能预警的实战能力^[5]。技术演进上,应加速5G、北斗、量子通信等先进通信技术在变电站的部署,为海量监测数据的低时延、高可靠传输提供保障。

5 结语

本文通过系统阐述智能预警系统在变电运维中的应用框架、关键技术与实施路径,且剖析其在设备状态精准评估与电网运行风险超前防控中的具体实践,证实该系统作为实现变电运维从被动应对向主动预警转变的核心驱动力。文章构建集智能传感、大数据分析人工智能算法于一体的技术体系,结合具体应用场景揭示其提升故障预警实时性、降低运维成本、增强电网韧性的实际价值。面对数据质量、算法适配及人才储备等现实挑战,所提出的优化路径为系统进一步集成创新与工程化落地提供明确方向。本研究为电力企业推进智能运维体系建设提供理论依据与实践指南,对保障电网安全、稳定、经济运行具有重要现实意义。

参考文献

- [1] 段伟笑,刘娟,殷仁亮,等.基于多模态人工智能的校园安全风险感知与预警系统研究[J].通信与信息技术,2025,(05):110-114+148.
- [2] 罗鑫亿,聂婷,罗鑫,等.建设工程招标投标合谋行为智能监测预警系统设计研究[J/OL].工程建设,1-8[2025-09-25].
- [3] 王小帅.智能监控设备在电动车棚火灾预警系统中的应用研究[J].中国设备工程,2025,(17):39-41.
- [4] 陈宁.基于物联网的电梯安全监测及预警系统研究[J].中阿科技论坛(中英文),2025,(09):83-87.
- [5] 张维国,于力,周建飞,等.基于激光差分测距与数据融合的机械位置闭环监控及智能预警系统研究[J].汽车工艺师,2025,(09):36-39.