

变电运维故障分析及技术应用研究

姚自阳 李营彪 李鹏宁

国网新疆电力有限公司哈密供电公司 新疆 哈密 839000

摘要：变电站作为电力系统的核心节点，其安全稳定运行是保障电网可靠供电的基石。然而，受设备老化、环境侵蚀、操作失误及外部干扰等多重因素影响，变电运维过程中故障频发，严重威胁电网安全。本文旨在系统性地构建一个涵盖故障机理、诊断方法与技术应用的完整研究框架。研究首先对变电运维中的典型故障进行科学分类，并深入剖析其内在成因；其次，系统梳理了从传统经验判断到现代智能诊断的故障诊断技术演进路径，重点阐述了基于数据驱动和知识驱动的先进诊断方法；再次，聚焦于人工智能、物联网、大数据等新一代信息技术在故障预警、精确定位与辅助决策中的创新应用模式；最后，全面评估了先进技术应用所带来的综合效益，并指出了在数据质量、模型泛化、系统集成等方面存在的现实挑战。本研究为提升变电运维的智能化、精准化水平，构建主动防御型运维体系提供了理论支撑与实践指引。

关键词：变电运维；故障分析；故障诊断；人工智能；状态检修

引言

变电站作为电力系统的核心枢纽，其运行状态直接关乎电网的安全、稳定与经济。随着电网规模扩大、设备数量激增及老化问题加剧，传统“定期检修、事后处理”模式已难以为继：人工巡检效率低、主观性强、易漏检；被动抢修常致故障扩大，带来经济损失与社会影响。在此背景下，深入分析变电运维故障并应用先进技术，成为实现精益化管理和本质安全的必然路径。故障分析不仅追溯事件成因，更揭示内在规律与潜在风险，为预防性维护提供科学依据；而智能化、数字化技术则是将分析成果转化为实际能力的关键，赋能运维人员实现故障的早发现、快定位、准处置。因此，开展“变电运维故障分析及技术应用研究”，对推动运维模式由“被动抢修”向“主动防御”转型具有重要理论与现实意义。

1 变电运维典型故障类型及成因机理分析

1.1 一次设备故障

一次设备直接参与电能的传输与变换，是故障的高发区。（1）变压器故障：常见故障包括绕组故障（如匝间短路、相间短路、接地故障），主要由绝缘材料老化、过电压冲击、制造缺陷或散热不良导致局部过热引发；铁芯故障（如多点接地、硅钢片短路），通常源于制造工艺问题或运行中金属异物进入；套管故障（如闪络、渗漏油），则多与密封失效、污秽积累或机械应力有关。（2）断路器故障：其主要功能是正常开断负荷电流和故障电流。常见故障有拒动/误动，原因可能涉及操作机构卡涩、控制回路断线、继电保护装置误判或储能系统失效；灭弧室性能劣化，如SF₆气体泄漏或分解产物超标，会严重影

响其开断能力；触头烧蚀磨损，则是长期电弧侵蚀和机械操作的必然结果。（3）互感器故障：包括电流互感器（CT）和电压互感器（PT）。CT二次侧开路会产生危及人身和设备安全的高电压；PT则可能发生铁磁谐振过电压或内部绝缘击穿。这些故障多由设计裕度不足、绝缘老化或外部短路电流冲击引起。（4）母线及隔离开关故障：母线故障常表现为接头过热，源于接触电阻过大或连接螺栓松动；隔离开关则可能出现分合闸不到位、触头过热或瓷瓶断裂等问题，主要与机械传动部件磨损、污秽闪络或外力破坏相关。

1.2 二次系统及辅助设施故障

二次系统是变电站的“大脑”和“神经”，其故障虽不直接中断主电路，但会严重影响监控、保护和控制功能。（1）继电保护及自动装置故障：包括装置硬件损坏、软件逻辑错误、定值整定不当或通道异常等，可能导致保护拒动（该动作时不动作）或误动（不该动作时动作），是电网事故扩大的重要诱因。（2）直流系统故障：直流电源为控制、保护、信号等回路提供能量。蓄电池容量不足、充电模块故障或直流接地，都可能导致全站控制失灵，后果极其严重^[1]。（3）通信与自动化系统故障：远动终端（RTU）、数据通信网关机等设备故障，会造成站内信息无法上送调度主站，形成“信息孤岛”，影响全局调度决策。（4）辅助设施故障：如站用交流电源失电、消防系统误报/失效、安防系统入侵告警失灵、环境温湿度失控等，虽为辅助系统，但其故障会间接影响主设备的安全运行环境，甚至诱发主设备事故。

1.3 故障成因的综合性分析

上述故障的发生,往往是多种因素交织作用的结果。内在因素主要包括设备的设计缺陷、制造工艺瑕疵、材料老化劣化以及长期运行积累的疲劳损伤。外在因素则涵盖了自然环境(如雷击、污秽、覆冰、高温、潮湿)、人为因素(如误操作、维护不当、施工遗留隐患)以及电网运行工况(如系统短路、谐波污染、电压波动)等。对故障成因进行综合性、深层次的剖析,是制定有效预防和应对策略的前提。

2 变电运维故障诊断技术体系

2.1 传统诊断方法

在自动化与信息化技术尚未普及的年代,故障诊断主要仰赖于一线运维人员的个人感官与长期积累的实践经验。他们通过肉眼观察设备外观是否存在变形、渗漏油、瓷瓶破损等明显异常;通过耳朵倾听变压器、电抗器等设备内部有无放电声、振动声等异响;通过鼻子嗅闻有无因绝缘材料过热而产生的焦糊气味;并辅以万用表、兆欧表、钳形电流表等便携式电工仪表,对电压、电流、绝缘电阻等基本电气量进行现场测量。这种诊断方式成本低廉,对突发性、显性故障具有一定的有效性。然而,其局限性也十分突出,高度依赖于个人的技能水平和精神状态,主观性强,缺乏客观统一的标准,尤其难以发现那些处于萌芽阶段、征兆微弱的潜伏性故障,且不同人员对同一现象的判断可能存在较大差异。

2.2 基于在线监测的诊断方法

该方法通过在变压器、断路器、GIS等关键设备上预先安装温度传感器、局部放电传感器、油中溶解气体分析(DGA)装置、SF₆气体密度及微水监测仪等,实现了对设备核心状态参量的连续、实时采集。这些数据通过站内通信网络汇集到后台监控系统,当某个参量的数值超过预设的安全阈值时,系统便会自动发出告警信号,提示运维人员关注。这种方法将故障发现的时机从定期的人工巡检点,拓展到了全天候的连续监控,显著提高了故障预警的及时性^[2]。然而,其诊断逻辑相对简单,主要停留在“超限即告警”的层面,未能充分利用多参量之间的内在关联和动态演变趋势,容易因环境干扰或传感器漂移产生误报,也可能因阈值设置不合理而漏掉一些缓慢发展的早期故障。

2.3 基于数据驱动的智能诊断方法

数据驱动的智能诊断方法依托机器学习与深度学习,从海量历史与实时监测数据中自动挖掘故障模式,摆脱对单一阈值的依赖。监督学习(如SVM、随机森林)需大量标注数据训练模型,可对新样本精准分类;无监督学习(如聚类、PCA)则在无标签条件下识别偏离正常

模式的异常点,适用于未知故障检测。深度学习表现尤为突出:卷积神经网络(CNN)能从红外图像或设备照片中识别微小温差或损伤;循环神经网络(RNN/LSTM)擅长捕捉电流、电压等时间序列中的动态异常征兆。尽管此类方法具备强大的自适应与非线性拟合能力,但其效果高度依赖数据质量与规模,且部分模型(如深度神经网络)决策过程缺乏透明度,存在“黑箱”问题,影响运维人员的信任与理解。因此,在实际应用中需兼顾性能与可解释性。

2.4 基于知识驱动的诊断方法

知识驱动的诊断方法依托专家经验与物理规律,与数据驱动方法互补。其典型代表包括:专家系统,通过“如果-那么”规则库和推理机模拟专家逻辑,具有过程透明、可解释性强的优点,便于运维人员理解和信任;故障树分析(FTA),采用自上而下演绎方式,将顶事件(如主变跳闸)逐层分解为中间事件和底事件,以逻辑门构建树状结构,清晰揭示所有可能故障路径及系统薄弱环节;贝叶斯网络,利用有向无环图表达变量间的条件依赖关系,结合贝叶斯公式进行概率推理,在信息不完整或不确定条件下,仍能计算各故障原因的后验概率,为复杂场景下的诊断与决策提供量化支持^[3]。这三类方法共同构成了基于领域知识的智能诊断体系,适用于需高可信度、强解释性或存在不确定性因素的变电故障分析场景。

3 先进技术在故障分析与处理中的应用

3.1 人工智能(AI)的深度赋能

AI技术正从辅助诊断走向核心决策。通过融合数据驱动与知识驱动的优势,可以构建更为鲁棒和智能的诊断引擎。例如,利用深度学习模型从原始监测数据中自动提取高维特征,再将这些特征输入到基于贝叶斯网络的推理框架中,结合专家规则进行最终决策,既保证了模型的准确性,又增强了结果的可解释性。此外,强化学习技术也被探索用于优化故障处置策略,通过模拟不同处置方案的后果,自主学习最优的应急响应流程。

3.2 物联网(IoT)与泛在感知

物联网技术通过部署低成本、低功耗、多功能的智能传感终端,构建了覆盖变电站全域的“感知神经末梢”。这不仅包括对一次设备关键状态量的监测,还延伸至对二次屏柜内部温湿度、小动物入侵、电缆沟水位等细微环境的感知。这种泛在、立体的感知能力,为故障分析提供了前所未有的丰富数据源,使得对故障的早期预警和精确定位成为可能。

3.3 大数据分析 with 预测性维护

变电站每天产生TB级的运行数据。大数据技术通过对这些多源异构数据（SCADA数据、在线监测数据、巡检记录、历史工单等）进行清洗、融合、存储和分析，能够揭示设备性能劣化的长期趋势和隐性关联。基于此，可以构建预测性维护（PdM）模型，精准预测设备的剩余使用寿命（RUL）和潜在故障时间窗口，从而将传统的“到期必修”转变为“按需检修”，在保障安全的前提下，最大化设备利用率，优化运维资源投入。

3.4 数字孪生（DigitalTwin）的可视化推演

数字孪生技术通过在虚拟空间中构建变电站物理实体的高保真、动态、实时的数字化镜像，为故障分析与处理提供了强大的可视化平台。运维人员可以在数字孪生体上进行故障复现、根因追溯、处置方案预演和效果评估^[4]。例如，当发生复杂故障时，可以在孪生模型中隔离故障区域，模拟不同的隔离和恢复方案，选择最优解后再在物理世界执行，极大地降低了操作风险和试错成本。

4 技术应用的综合效益与挑战

4.1 综合效益分析

（1）提升故障处置效率与准确性：智能化的诊断与辅助决策系统，能够将故障平均定位时间（MTTR）从小时级缩短至分钟级，大幅减少停电损失。同时，基于数据和模型的诊断结果，比人为主观判断更为客观、准确。（2）增强电网安全与韧性：通过早期预警和主动干预，可以有效防止小缺陷演变为大事故，提升了变电站乃至整个电网的抗扰动能力和自愈能力。（3）优化运维资源配置：预测性维护模式改变了“一刀切”的检修策略，使有限的人力、物力和财力能够精准投向最需要关注的设备和环节，实现了运维成本的精细化管控。（4）改善人员作业模式：运维人员的工作重心从繁重的体力劳动和重复性巡检，转向更高层次的数据分析、策略制定和应急指挥，职业价值感和安全性得到双重提升。

4.2 面临的主要挑战

（1）数据质量与治理难题：现场采集的数据常存在噪声大、缺失、不一致等问题，高质量的数据是智能模

型发挥效能的基础，数据治理工作任重道远。（2）模型的泛化能力与可解释性：许多AI模型在特定场景下表现优异，但换一个变电站或设备类型后性能可能急剧下降，泛化能力不足。同时，部分深度学习模型如同“黑箱”，其决策过程缺乏透明度，难以获得运维人员的信任。（3）系统集成与标准缺失：不同厂家、不同年代的设备和系统协议各异，形成了严重的“信息孤岛”，系统集成难度大、成本高。统一的数据接口和通信标准亟待建立。（4）复合型人才短缺：既精通电力系统专业知识，又掌握AI、大数据等IT技能的跨界复合型人才极度匮乏，制约了先进技术的深度应用和持续创新。

5 结语

变电运维故障分析及技术应用研究，是保障现代电网安全、高效、可靠运行的核心课题。本文系统地梳理了变电运维中的典型故障类型及其深层成因，构建了从传统经验到现代智能的故障诊断技术体系，并深入探讨了人工智能、物联网、大数据、数字孪生等前沿技术在故障预警、诊断、定位与处置中的创新应用模式。研究表明，先进技术的应用能够带来运维效率、安全水平和经济效益的全面提升。然而，要充分发挥其潜力，必须正视并解决数据质量、模型泛化、系统集成和人才储备等方面的现实挑战。未来，变电运维将朝着更加自主化、协同化和生态化的方向发展，一个深度融合物理世界与信息世界的智能运维新范式正在形成，这将为构建新型电力系统和实现能源互联网宏伟蓝图奠定坚实的基础。

参考文献

- [1]王荻.变电运维故障分析及技术应用研究[J].电力设备管理,2025,(03):14-16.
- [2]张泽.电力系统变电运维中智能监测与故障诊断系统设计[J].电气技术与经济,2026,(04):273-275.
- [3]史乐,蒙文华.状态检测与故障诊断技术在变电运维中的应用[J].电子技术,2025,54(12):332-333.
- [4]宰睿.变电运维中的故障处理策略分析[J].集成电路应用,2025,42(05):254-255.