

变电站智能运维系统的构建与实践

盛琪 徐强

国网冀北电力有限公司秦皇岛供电公司，河北省秦皇岛市，066000；

摘要：在电力行业智能化转型的关键时期，传统变电站运维模式因效率低、成本高、安全隐患多等问题，已难以满足新型电力系统建设需求。本论文系统探讨变电站智能运维系统的构建与实践，深入解析其架构设计，涵盖感知层的设备数据实时采集、网络层的高效稳定传输以及应用层的智能分析决策。详细阐述设备状态监测、故障诊断预警、智能巡检、智能决策支持等核心功能的实现路径，并针对数据安全防护、多设备集成兼容、专业人才短缺等构建难题，提出建立主动防御体系、制定统一技术规范、深化产学研合作等应对策略。通过案例研究表明，该系统能够显著降低故障发生率，提升运维效率，减少人力与资源成本，为变电站智能化升级及电力行业高质量发展提供理论与实践支撑。

关键词：变电站；智能运维系统；系统构建；应用实践

DOI：10.69979/3041-0673.25.09.017

引言

在“双碳”目标与新型电力系统建设的时代背景下，电力行业正经历前所未有的变革。变电站作为电力传输与分配的核心枢纽，其运行状态直接影响电网稳定性与供电可靠性。据国家能源局统计，2023 年全国因变电站设备故障引发的停电事件中，约 60% 与运维不及时或诊断失误相关。传统运维模式依赖人工巡检与定期检修，难以满足现代电网对高可靠性、高效率的要求。随着物联网、大数据、人工智能等技术的成熟，构建变电站智能运维系统成为电力行业转型升级的关键突破口。该系统通过设备状态实时感知、数据智能分析与决策自动化，可有效弥补传统模式短板，推动变电站运维向智能化、精细化方向发展。

1 变电站传统运维模式的局限性

1.1 人工巡检的弊端

人工巡检作为传统运维的核心手段，受限于物理条件与人为因素，存在诸多缺陷。运维人员需按固定周期徒步检查设备，面对占地面积达数万平方米的大型变电站，单次巡检耗时长达 4—6 小时^[1]。由于间隔时间长，设备异常难以及时发现。例如，2022 年 11 月，广东湛江麻章变电站因人工巡检间隔期内未能发现主变压器油温异常，最终导致绕组局部过热，造成区域电网短时停电。此外，人工巡检依赖运维人员的经验与责任心，对隐蔽部位如电缆沟内部、绝缘子串间隙等检测能力有限。南方电网公司调研显示，人工巡检对绝缘子表面裂纹的漏检率高达 18%，严重威胁电网安全。

1.2 定期检修的不足

定期检修遵循“到期必修”原则，虽能保障设备基础性能，但资源浪费与安全隐患并存。以浙江杭州良渚的 220kV 变电站为例，2023 年统计数据显示，其变压器年度检修中，73% 的检修项目实际未达到故障临界状态，造成人力、物力资源浪费。同时，部分设备因过早拆卸导致密封件老化加速，反而增加故障风险。更严峻的是，定期检修需计划性停电，影响用户用电体验。据测算，一座 110kV 变电站单次全停检修，将导致约 2 万户居民中断供电 3—5 小时，对工商业用户造成的经济损失可达数十万元。

1.3 信息共享与决策困难

传统运维模式下，数据分散于不同部门与系统。设备台账存于物资管理部门，巡检记录由运维班组保管，故障报告归属检修部门，各环节缺乏统一数据标准与共享机制。2024 年 3 月，江苏南京西环 220 千伏变电站发生断路器异常跳闸事件，运维人员因无法快速获取该设备近 3 年的操作记录、试验数据及同类故障案例，导致故障定位耗时长达 4 小时，远超行业平均水平。此外，人工分析数据效率低下，面对海量监测数据，难以挖掘潜在规律，致使决策缺乏科学性，增加电网运行风险。

2 变电站智能运维系统的架构设计

2.1 感知层

感知层作为系统的“神经末梢”，承担设备运行状态信息采集重任。在变压器监测中，通过植入光纤温度传感器，可实现绕组、油温的毫米级空间分辨率监测，测温精度达 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。GIS 组合电器则采用局部放电特高频传感器，能捕捉皮秒级脉冲信号，提前发现内部绝缘

缺陷。2023 年投运的山东济南鹊山 220kV 变电站，部署了 300 余套智能传感器，涵盖温度、振动、局放等 8 类参数监测，实现设备状态全维度感知。此外，高清视频监控系統配备 AI 识别模块，可自动检测设备外观异常、人员违规操作等行为，极大提升现场监控能力。

2.2 网络层

网络层构建起数据传输的“高速公路”，采用“光纤+5G”双网融合方案。在长距离主干网，依托 OPGW 光缆实现万兆级数据传输，保障实时性与稳定性；在设备终端侧，利用 5G 网络实现灵活接入，解决传统电缆布线难题^[2]。例如，2024 年湖北武汉光谷变电站，通过 5G 切片技术划分生产控制、视频监控等独立通道，实现数据传输时延低于 10ms，丢包率小于 0.1%。同时，网络层集成国密 SM4 加密算法与防火墙，对传输数据进行动态加密，确保数据在采集、传输、存储全流程的安全性。

2.3 应用层

应用层是智能运维系统的“大脑”，集成多维度功能模块。数据管理系统采用分布式存储架构，可支撑 PB 级数据存储与秒级检索。在数据分析环节，运用 LSTM 神经网络对历史数据建模，预测设备故障概率^[3]。如北京海淀变电站应用该技术后，主变压器油色谱异常预测准确率达 92%。故障诊断系统融合专家经验与机器学习算法，建立包含 2000 余个故障特征的知识库，实现故障类型、位置、严重程度的快速判定。智能决策模块基于优化算法，结合天气、负荷等因素，自动生成检修计划，相比人工决策效率提升 70%。

3 变电站智能运维系统的功能实现

3.1 设备状态监测

设备状态监测通过多源数据融合实现精准感知。以断路器监测为例，系统同步采集机械振动、分合闸线圈电流、储能压力等参数，运用 D-S 证据理论融合分析^[4]。2023 年河南郑州官渡 220 千伏变电站，通过智能运维系统成功预测 ZN85-40.5 型断路器分合闸机构卡涩故障，提前 72 小时发出预警，避免事故发生。系统还具备趋势分析功能，对变压器油中溶解气体浓度进行长期跟踪，采用灰色预测模型推算气体增长趋势，为设备寿命评估提供依据。

3.2 故障诊断与预警

故障诊断系统采用“机理模型+数据驱动”双引擎架构^[5]。在变压器故障诊断中，结合油色谱三比值法与卷积神经网络，对故障类型的识别准确率达 95%。2024

年安徽合肥政务 220 千伏变电站，系统通过分析主变油中乙炔浓度异常上升趋势，结合振动频谱特征，精准定位至铁芯多点接地故障，避免因故障扩大导致的主变烧毁事故。预警模块设置多级阈值，根据故障严重程度发送短信、语音等不同形式告警，并自动生成处理建议，指导运维人员快速处置。

3.3 智能巡检

智能巡检系统实现“空-地”一体化覆盖。无人机搭载激光雷达与红外热像仪，对输电线路、架构等高空设备进行巡检，单次巡检效率较人工提升 8 倍；地面巡检机器人配备超声波局放检测仪、可见光相机，对开关柜、保护屏等室内设备进行自主巡检^[6]。2023 年上海浦东康桥 500kV 变电站，智能巡检机器人日均完成 800 余个检测点数据采集，发现设备缺陷 23 起，其中 5 起为人工难以发现的微小异常。机器人巡检数据实时上传系统，自动生成巡检报告，大幅减轻运维人员工作强度。

3.4 智能决策支持

智能决策支持系统融合电网运行状态、设备健康度与外部环境因素^[7]。在检修决策方面，基于遗传算法优化检修策略，以广东江门新会变电站为例，系统将年度检修次数从 6 次优化至 4 次，节约成本约 120 万元。在应急处置中，系统根据故障类型自动调取应急预案，结合实时负荷数据生成负荷转移方案。2024 年台风“杜苏芮”期间，福建厦门集美 220 千伏变电站智能决策系统 3 分钟内完成故障隔离与负荷转供方案制定，保障了重要用户持续供电。

4 变电站智能运维系统构建面临的挑战及应对策略

4.1 数据安全与隐私保护

智能运维系统产生的设备参数、操作记录等数据涉及电网核心信息。2023 年内蒙古电力（集团）有限责任公司发生数据泄露事件，导致区域电网拓扑结构、设备参数等敏感信息外流。为应对该问题，需构建“主动防御+被动检测”体系：在数据采集端采用同态加密技术，实现密文状态下数据处理；在传输层部署量子密钥分发系统，保障数据传输安全；建立数据脱敏机制，对共享数据进行不可逆匿名化处理。同时，通过入侵监测系统实时监控数据访问行为，一旦发现异常立即阻断。

4.2 系统集成与兼容性

不同厂商设备接口标准差异导致系统集成困难。例如，山东济南鹊山 220 千伏变电站在引入国电南瑞科技股份有限公司生产的智能巡检机器人时，因机器人采用

的私有通信协议与站内主系统遵循的 IEC61850 标准不兼容,导致机器人采集的数据无法接入主系统。解决该问题需制定统一技术规范,参考 IEC61850 标准建立设备信息模型。同时,开发协议转换网关,支持 Modbus、DL/T634.5104 等多种协议转换。在浙江宁波明州 500 千伏变电站改造项目中,通过部署由北京智芯微电子科技有限公司开发的协议转换平台,实现了许继电气股份有限公司、平高集团有限公司等 12 家厂商设备的无缝对接,显著提升系统集成效率。

4.3 人才短缺

智能运维涉及多学科知识,电力行业专业人才储备不足。据《2024 中国电力人才发展报告》显示,数据分析、人工智能领域专业人才缺口达 40%。为此,需构建“产学研用”协同培养体系:电力企业与高校合作开设智能运维专业方向,如华北电力大学开设“智能电网信息工程”专业;建立企业内部培训基地,邀请行业专家开展专题培训;完善人才激励机制,对掌握核心技术的人员给予专项奖励,吸引高端人才投身智能运维领域。

5 变电站智能运维系统的实践案例分析

5.1 案例背景

2023 年,四川成都天府新区万安 110kV 变电站因传统运维模式效率低下,年故障停电时间达 23 小时,严重影响周边高新技术企业供电。为提升供电可靠性,该变电站启动智能运维系统改造项目。

5.2 系统构建过程

项目分三期实施:一期部署感知层设备,安装温度、局放传感器 217 套,高清摄像头 18 台;二期搭建网络层,敷设光缆 12 公里,开通 5G 专网;三期开发应用层系统,包括状态监测、故障诊断等 6 大模块。建设过程中,与南瑞继保、华为等企业合作,解决系统兼容性问题,并对运维人员开展为期 3 个月的专项培训。

5.3 实践效果

系统投运后成效显著:故障停电时间缩短至 3 小时,降幅达 87%;运维人员数量减少 40%,年节约人工成本 80 万元;通过智能决策优化检修计划,设备检修费用降低 35%。2024 年夏季用电高峰期间,系统成功预警主变过负荷风险 3 次,通过负荷转移避免了设备损坏,保障了区域电网稳定运行。

6 结论与展望

6.1 结论

研究表明,变电站智能运维系统通过技术创新与管理优化,有效解决了传统运维模式的痛点。其架构设计实现设备状态全面感知、数据高效传输与智能决策;功能模块显著提升故障预防、诊断与处置能力;应对策略为系统安全稳定运行提供保障。实践案例证明,该系统可大幅提高运维效率、降低成本、增强电网可靠性,具备良好的推广价值。

6.2 展望

未来,智能运维系统将向三个方向深化发展:一是融合数字孪生技术,构建变电站虚拟镜像,实现物理实体与虚拟模型实时交互;二是应用边缘计算技术,将数据分析能力下沉至设备端,进一步降低数据传输压力;三是探索多站融合运维模式,整合变电站与储能电站、数据中心等设施,提升综合能源管理水平。同时,需持续完善安全防护体系,应对新型网络攻击威胁,推动电力行业智能化发展迈向新高度。

参考文献

- [1] 胡建侠. 基于虚拟现实技术的变电站远程巡检方案及关键技术[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(10): 168-171.
- [2] 庞人宁. 变电站智能机器人巡检技术研究[J]. 电气开关, 2022, 60(04): 19-22+27.
- [3] 马春阳, 沈振. 关于智慧变电站联合巡检技术的研究[C]//中国电力设备管理协会. 中国电力设备管理协会第二届第一次会员代表大会论文集(1) 国电南瑞南京控制系统有限公司; , 2022: 64-67.
- [4] 王丹, 高治良, 林东跃. 智能化数字式变电站的监测系统研究[J]. 现代信息科技, 2025, 9(06): 14-19.
- [5] 黄志坡. 人工智能技术对变电站运维效率提升的影响[J]. 中国新技术新产品, 2025, (06): 20-22.
- [6] 孟丽娜. 变电站智能巡检监控系统的应用[J]. 自动化应用, 2025, 66(05): 184-186.
- [7] 季竹清. 智能巡检系统在变电运维中的应用分析[J]. 中国高新科技, 2025, (04): 72-74.

作者简介: 盛琪, 出生年月: 1992 年 8 月 19 日, 性别: 女, 民族: 汉, 籍贯: 黑龙江省通河县, 学历: 硕士研究生, 职称: 工程师, 研究方向: 智能技术在变电站中的应用。

徐强, 出生年月: 1991 年 9 月 7 日, 性别: 男, 民族: 汉, 籍贯: 辽宁省北票市, 学历: 硕士研究生, 职称: 工程师, 研究方向: 电力系统方向。