

供配电线路运行状态自动监测研究

邬 杰 张 婧

内蒙古电力集团乌海供电公司 内蒙古 乌海 016000

摘 要：随着电力系统的不断发展，供配电线路的运行状态监测对于确保电网的安全稳定运行至关重要。在实际应用中，供配电线路运行状态自动监测方法面临诸多困境。现有电线路运行状态自动监测方法未对图像高维特征进行解析，使得大量有用信息丢失，从而影响监测的准确性。供配电线路运行状态自动监测分析是现代电力系统的核心环节，对保障电网安全、提升供电可靠性及优化运维效率具有关键作用，自动监测分析是构建高弹性配电网的核心基石，通过数字化手段重塑“安全-效率-经济性”平衡，为能源转型提供底层支撑。

关键词：供配电线路；运行状态自动监测；研究

供配电线路运行状态自动监测分析通过融合传感技术、通信技术与智能算法，实现对线路运行状态的实时感知、故障预警及精准处置。

1 供配电线路运行状态自动监测分析重要性

1.1 强化安全防御与风险预警能力。实时隐患识别，通过传感器与物联网技术，实现毫秒级高频采样，精准捕捉线路暂态突变、电弧故障等微观异常，提前预警电气火灾等安全隐患，变被动响应为主动防御。设备状态评估，对电缆温度、绝缘老化、振动频率等参数持续监测，结合大数据分析预测设备寿命，避免突发故障导致大面积停电。自然灾害应对，实时监测覆冰厚度、风偏角度等环境参数，支撑山火、台风等灾害预警，缩短应急响应时间至15分钟以内。

1.2 提升故障处置效率与供电可靠性。故障快速定位隔离，自动触发故障录波与AI诊断，精准定位故障点（误差 $\leq \pm 300$ 米），百秒内完成故障研判，隔离时间缩短至30秒内，避免人工逐级排查导致的延迟。自愈式供电恢复，基于多联络网架结构，自动执行非故障区负荷转供策略，如通过联络开关合闸恢复供电，用户停电时间减少55%以上。减少运维成本，远程监测替代80%人工巡检，故障排查人工成本降低75%，单条500kV线路年运维成本下降40%。

1.3 优化能效管理与系统规划。负载动态调控，实时监测电压、电流、谐波等参数，识别负荷畸变线路，动态调整运行方式提升电能质量，降低线损。资源利用率提升，通过潮流分析优化分布式能源（如光伏）接入与消纳，设备利用率提高20%，减少备用容量建设投资。数据驱动决策，积累长期运行数据支撑网架改造规划，如基于历史故障分布优化分段开关布局，提升线路互供能力。

2 供配电线路运行状态监测技术

2.1 故障定位技术。行波监测，通过分布式终端捕捉故障行波信号，结合时间差计算实现故障点精确定位（精度 ± 90 米），支持短路、接地故障的毫秒级响应。融合暂态零序比较法、行波极性法，接地故障选线准确率 $\geq 98\%$ 。振荡波局放检测，利用行波形反射定位电缆绝缘缺陷（如局部放电），适用于地下电缆隐患检测（如湖南株洲电网年处理隐患超百处）。

2.2 状态感知技术。分布式光纤传感，部署特种光纤实时监测温度、振动，空间分辨率达0.64mm，定位精度 ± 1 米，支持无盲区长距离监测（单通道最长20公里）。量子光纤传感，磁场测量灵敏度0.1pT（较传统提升3个数量级），可检测接地网0.02 Ω 级腐蚀电阻变化。多参数采集终端，集成电流/电压传感器（量程0-600A）、局部放电检测（灵敏度5pC）、温度传感器等，实时监测过热、绝缘老化等隐患。

2.3 环境与外力监测。自然灾害预警，监测覆冰厚度、风偏角度等参数，结合图像识别技术预警山火、外力破坏等风险，缩短应急响应时间1417。山火监测准确率95%，覆冰厚度误差 < 2 mm，提前预警时间达6小时。机械状态监测，实时监测导线接头温度、负荷电流，动态预警过载或接触不良导致的过热隐患，MEMS传感器实时捕捉导线舞动（0.1-10Hz）、微风振动（10-100Hz）信号。外力破坏防控，图像识别技术（1080P高清）智能辨识施工机械接近（预警距离500米）、树障鸟害等风险。实时捕捉树障、鸟害引发的瞬时性接地放电，通过自学习算法分类隐患类型（定位准确率 $\geq 99\%$ ），提前预警绝缘薄弱点2。

2.4 设备状态评估。运行参数采集，持续监测线路电流、电压、谐波等参数，评估电能质量及负载均衡状

态，辅助优化能效。寿命预测分析，基于电缆温度、振动频率、局部放电等数据，预测绝缘老化趋势及设备剩余寿命。环境适应性检测，验证线路在高温、潮湿等极端条件下的性能稳定性，确保全场景可靠运行。

2.5 智能诊断与决策。边缘AI分析，终端内置ARM+FPGA架构边缘计算模块（算力5TOPS），实现故障本地化毫秒级诊断。深度学习算法，故障类型智能识别准确率98.5%，支持电弧故障、树枝碰线等复杂场景判断。自适应阈值优化，动态调整预警阈值，结合历史数据与相邻节点状态，误报率<1.5%。

2.6 通信与能源技术。混合组网通信，4G/5G+NB-IoT双模传输，高频数据延迟<10ms，低频数据功耗降低70%。复合取能技术，太阳能+感应取电（适用交流线路），保障野外设备续航≥3年。远程通信与控制，多模通信传输，支持4G/5G、LoRa、光纤等通信方式，实时传输故障录波、温度曲线等数据至后台系统。远程指令执行，接收主站指令远程操控开关分合闸，实现非故障区负荷转供及自愈式复电。智能交互平台，通过WEB平台或移动端推送告警信息，提供可视化运行状态图谱及历史数据分析接口，核心功能技术指标对比如表1。

表1 供电线路运行状态监测核心功能技术指标对比

功能类型	关键技术	核心指标	应用效果
故障定位	分布式行波测量	精度±90米，响应时间≤1秒	人工排查范围缩小90%
隐患预警	自学习放电辨识算法	定位准确率≥99%	预防性维护效率提升40%
状态评估	多参数融合分析	局部放电灵敏度达2pC	设备突发故障率降低50%
远程通信	边缘计算+物联网协议	支持1000节点并发通信	运维响应速度提升至分钟级

3 供电线路运行状态自动监测分析

3.1 核心监测技术。分布式传感技术，光纤传感：部署特种光纤线路，实时监测温度、振动参数，空间分辨率达0.64mm，定位精度±1米，适用于长距离无盲区监测。行波监测：捕捉故障电流行波信号，结合时间差计算实现故障点定位，精度±90米，可识别树障、鸟害引发的瞬时接地故障。多参数采集：通过电流/电压传感器、局部放电检测装置（灵敏度5pC）及温度传感器，实时监测电气接点过热、绝缘老化等隐患。智能诊断算法，基于深度学习的故障识别准确率超98.5%，支持短路、接地故障的毫秒级预警。采用暂态录波技术，结合AI分析暂态波形，实现小电流接地选线准确率≥98%，避免人工试送电风险。

3.2 智能分析与决策。故障闭环处置，馈线自动化

（FA）：主站系统联动终端设备，故障时自动隔离非故障区段，恢复供电时间从小时级缩短至秒级。例如，电压时间型FA策略通过X/Y时限控制开关合闸逻辑，实现故障区段快速锁定。故障模拟测试：利用配电自动化测试仪（如配电之星-P2200）注入模拟故障电流，验证FA策略可靠性。预测性维护，分析历史数据建立设备健康模型，预警变压器绝缘劣化（如油中气体监测）、电缆接头过热等隐患，故障发生率降低63%。

4 供电线路监测系统应用场景

4.1 城市与人口密集区。校园/公共场所安全用电，实时监测宿舍、食堂、实验室等区域的漏电、过载及故障电弧，精准预警电气火灾隐患，预警信息直推管理人员移动端。系统适配复杂线路环境，安装便捷且不影响正常用电。城市配电网，实时监测线路负荷、温度等参数，及时发现过载、短路问题，保障高密度负荷区域供电安全。馈线自动化（FA）系统实现故障秒级隔离与自愈。

4.2 野外与复杂环境。长距离输电线路，特高压工程部署分布式监测装置，实时预警覆冰、山火等灾害，定位精度达±300米。行波定位技术累计完成超3000次故障定位，准确率92.7%。高海拔/恶劣气候区，耐候型监测装置适应-30℃~70℃温差、95%高湿环境，解决高原低气压导致的结构损伤问题。太阳能供电系统保障偏远地区设备续航≥3年，支持无市电区域的舞动、覆冰监测。沿海与盐雾腐蚀区，纳米涂层防护技术提升设备耐盐雾能力，500小时盐雾试验无腐蚀，保障海岛供电可靠性。

4.3 基建与工业场景。建筑工地用电安全，电流互感器（精度0.5级）捕捉0.1A级漏电变化，AI动态阈值模型将误报率降至0.3%以下。联动门禁系统阻断违规大功率电器使用，某项目违规电磁炉事件减少92%。高速公路隧道供电，集中监控隧道内照明、通风及排水设备，实现无人值守与故障快速处置。多站融合技术保障关键点供电连续性，如低压发电车同期并网实现用户“零感知”停电。

4.4 乡村与新型示范区。农村电网，NB-IoT低功耗通信覆盖弱信号区域，实时上报故障位置与类型，提升抢修效率。“近零碳”智慧乡村，源网荷储协同调控：屋顶光伏全覆盖+台区储能调节30%负荷，客户平均停电时间趋近于。

5 供电线路监测技术的未来发展趋势

根据行业技术演进与实践反馈，供电线路监测技术的未来发展趋势主要体现在量子感知、智能诊断、通信架构革新及多技术融合四大方向，具体如下：

5.1 量子感知技术规模化应用。超高精度电流测量，

量子电流传感器基于金刚石氮-空位(NV)色心技术,磁场灵敏度达0.1pT级,实现±800kV特高压线路毫安级至千安级电流的全量程监测,精度提升至0.06%(传统设备约0.5%),突破强电磁干扰环境下的测量瓶颈。极端环境适应性,量子光纤传感可在-40℃至+85℃宽温域、1.6MPa高压环境下稳定运行,覆冰、山火等恶劣工况误报率降低至1.5%以下。非接触式安全监测,通过光纤耦合实现非侵入式测量,避免传统传感器需切断电路的缺陷,显著提升操作安全性。

5.2 AI诊断向预测性维护跃升。故障预测精度突破,深度学习算法融合多源数据(温度、振动、局部放电),故障预测准确率提升至>98.5%,设备突发故障率降低50%。自愈能力动态优化,基于实时负荷数据的自适应控制策略,实现故障隔离与复电决策自动化,用户停电时间缩短55%以上。数字孪生深度应用,构建线路全生命周期健康模型,仿真各类故障演进路径,支撑预防性维修决策(如绝缘老化提前6个月预警)。

5.3 通信架构升级与边缘智能。5G-边缘计算协同,5G网络切片技术保障μs级时间同步,边缘节点就地处理90%高频采样数据(1MHz),通信延迟降至10ms内,解决山区信号盲区问题。多模态混合组网,光纤/LoRa/卫星通信互补覆盖,支持单通道20公里长距离监测与1000节点并发接入,数据断流率从30%降至<3%。轻量化终端部署,MEMS传感器与微型化设计使装置重量<5kg,太阳能+蓄电池供电方案保障无源区域持续运行。

5.4 多技术融合与系统重构。能源互联网适配,动态优化光伏/风电波动性功率接入,新能源消纳能力提升

20%,减少备用容量投资。全要素感知扩展,集成环境参数(覆冰、风偏、山火)与电气量同步分析,应急响应时间缩短至15分钟。开放式平台生态,提供API接口接入第三方算法,支持定制化能效分析与碳排放核算,助推电网双碳目标达成。

综上所述,融合边缘计算、人工智能及数字孪生技术,实现故障预测准确率>98.5%²,推动配电系统向"可观、可测、可控、可主动"的智慧运维模式转型。规模化部署监测装置后,电网重大事故率下降63%,新能源消纳能力提升20%。

参考文献

- [1]刘林录.输电线路避雷器全生命周期状态在线监测方法[J].自动化技术与应用,2024,43(2):60-63+115.
- [2]吴宸颖.基于智能监测技术的输电线路外破点位快速精准识别[J].粘接,2024,51(1):177-180.
- [3]苏振波.城市电网输电线路立体化在线监测系统配置方案及研究[J].电力与能源,2023,44(4):351-354+413.
- [4]李念栋.基于OPGW技术的输电线路外破灾害监测系统[J].电子设计工程,2023,31(14):147-150+156.
- [5]黄海鹏.基于OPGW光纤应变解析的输电线路外破灾害监测系统[J].电子设计工程,2023,31(13):128-131+136.
- [6]何捷兰.基于分布式电流行波监测的输电线路故障精确定位装置研制[J].科学技术与工程,2023,23(18):7798-7808.