

电力系统故障诊断与智能修复技术的研究与应用

李惟旭

国网呼伦贝尔供电公司项目管理中心 内蒙古 呼伦贝尔 021000

摘要：电力系统是由电能的产生、变换、传送、分配和消费的各种设备，按照一定的需求组成的有机系统的总称，也是大型机电系统的重要组成部分，电力系统的稳定可靠运行对机电系统的安全运行十分重要。电力系统故障诊断是电力系统设计，电力系统与机电系统保护等的重要研究内容。电力系统故障诊断中的智能化技术主要包括电力系统仿真，先进故障诊断算法，先进故障诊断设备等技术。

关键词：电力系统；故障诊断；智能修复技术；应用

电力系统智能故障诊断技术包括电力系统仿真，先进故障诊断算法，先进故障诊断设备等技术。其中电力系统仿真技术是进行电力系统铺设前的预处理手段，通过仿真结果评估真实物理系统可能会发生的故障。

1 电力系统故障诊断技术

1.1 传统检测技术。感官诊断与参数测试。六诊法：

依靠口问、眼看、耳听、鼻闻、手摸等感官判断设备异常，配合电压表、电流表、电阻表等工具进行参数验证，快速定位烧焦、短路等显性故障。常规检查法：全面排查电源插头、开关、电线等物理连接状态，适用于初步故障筛查。

1.2 智能算法与应用。专家系统与推理机制。基于预设规则库模拟专家经验，通过逻辑推理实现故障判定，但需动态更新知识库以适应复杂场景。机器学习与优化算法。神经网络：通过CNN、LSTM等模型分析时序数据，识别短路、过载等模式。支持向量机（SVM）：结合粒子群优化算法，提升小样本分类准确性。贝叶斯网络：处理不确定性信息，评估故障概率并生成诊断路径。

1.3 多源数据融合技术。多模态数据协同分析。整合SCADA、振动传感器、红外测温等数据，利用滑动窗去噪自编码器（SW-DAE）提取特征，提升诊断鲁棒性。信息融合技术综合保护装置、录波文件等多源信号，消除单一数据偏差。

1.4 故障定位技术。分布式监测与行波定位。在输电线路上部署智能终端，通过故障电流方向和行波到达时间差实现区间定位，缩小排查范围。结合高频采样（如1024点/周波）捕捉行波波特性，精确定位故障点。

1.5 预测性与专项技术。状态监测与预测维护。红外诊断：利用红外热成像检测设备局部过热，提前预警绝缘老化等问题。太赫兹光谱分析：针对变压器绝缘油进行光谱特征提取，结合CEEMD分解与模糊熵量化故障类

型。韧性增强技术。基于多智能体系统（MAS）构建分布式协同诊断网络，提升大规模电网容错能力。技术发展趋势。边缘计算与实时性优化：在监测终端本地部署轻量化AI模型，缩短故障响应延迟。数字孪生与仿真验证：构建电网虚拟镜像，模拟故障传播并验证修复策略有效性。

2 电力系统故障诊断与智能修复技术研究与应用现状

2.1 核心技术发展。智能诊断算法升级。基于深度学习（CNN、LSTM）的故障识别技术已实现短路、电弧等多类故障的精准分类，检测精度突破90%。强化学习技术应用于动态优化修复策略，通过智能体与环境的交互训练，生成自适应响应路径。多模态数据融合应用。整合SCADA系统、振动传感器、红外热成像等多源数据，结合滑动窗去噪自编码器（SW-DAE）提取故障特征，消除单一数据偏差。无人机搭载多光谱传感器实现输电线路三维建模，结合AI算法实时标记设备异常（如雷击灼痕、锈蚀）。智能修复技术创新。基于数字孪生技术的仿真系统，可模拟故障传播路径并验证拓扑重构、负荷转移等修复方案的有效性。预测性维护模式通过设备健康度评估模型，提前预警绝缘老化等问题，实现从被动修复到主动防御的转变。

2.2 典型应用现状。输电环节。采用无人机集群搭载“巡眼云盒”实现全自动巡检，20分钟内完成山区高压线塔突发故障的诊断与定位。AI输煤巡检机器人通过改进DeepLab-v3+网络识别皮带跑偏与撕裂故障，告警响应时间缩短至30秒。变电环节。超高压变压器局部放电监测采用UHF技术与深度学习结合，实现早期绝缘故障预警。红外热成像与太赫兹光谱分析技术应用于变压器油状态检测，定量识别老化程度。配电环节。多智能体系统（MAS）构建分布式协同诊断网络，通过模糊理论与贝叶斯网络提升配电网容错能力。基于EmpowerX工业互

联网平台的三维可视化系统,实现配电网故障“一屏统管”与智能隔离。

2.3 技术挑战。数据整合难题。电力系统多源异构数据(电磁信号、振动波形等)的实时同步与清洗仍依赖联邦学习技术突破。边缘计算瓶颈。轻量化AI模型在低算力终端的部署面临精度损失问题,需优化模型剪枝与量化技术。新能源适配性不足。风电、光伏接入引发的间歇性故障特征与传统电网差异显著,现有算法泛化能力受限。

3 电力系统故障诊断与智能修复技术的难点与挑战

3.1 数据层面的复杂性。多源异构数据融合难题。电力系统需整合SCADA监测、振动传感器、红外热成像等多模态数据,但不同采样频率与格式的数据难以实现同步对齐,导致特征提取效率下降。例如局部放电监测中,超声波信号与电磁波信号的时延差异可能影响故障定位精度。噪声干扰与数据质量。行波定位技术需在电磁噪声背景下提取微弱故障信号,但雷电干扰、设备振动等环境噪声会导致信号衰减与畸变(输电线路高阻抗故障检测误差率可达35%)。

3.2 算法模型的适配性挑战。新能源场景泛化能力不足。风电、光伏等间歇性电源引发的新型故障模式(如低电压穿越失败、虚拟同步振荡),传统基于稳态特征的诊断算法误判率增加40%以上。动态系统建模复杂度高。数字孪生技术需同步仿真物理设备与信息流,但大型电网的拓扑实时变化特性导致模型更新延迟,难以准确预测故障传播路径。小样本学习瓶颈。极端故障案例稀缺制约AI模型训练,如变压器铁芯多点接地故障的样本不足导致LSTM模型预测偏差超过20%。

3.3 新型电力系统适配挑战。高比例电力电子设备特性。新能源并网导致故障电流呈现弱惯性、低短路比特征,传统过流保护装置误动率提升27%。韧性提升与成本矛盾。构建全网协同修复系统需新增智能终端与通信网络,初期投资成本增加30%以上,制约中小型电网应用推广。突破方向。联邦学习与迁移学习:构建跨区域电力数据共享机制,提升模型泛化能力。光子计算芯片:研发专用AI加速硬件,实现毫秒级故障诊断响应。数字孪生-物理系统闭环验证:通过虚实交互迭代优化修复策略。

4 电力系统智能修复技术分类及关键技术

4.1 快速自愈控制技术。智能分布式保护与协同自愈。采用线路差动保护与网格化保护双重主保护技术,实现百毫秒级故障隔离,结合GOOSE通信实现跨区域协同自愈,复电时间控制在300毫秒内。广域防孤岛保护技术主动切除非关键负荷,保障核心区域供电可靠性达

99.999%。动态拓扑重构与负荷转移。基于AI算法的自适应策略,实时调整电网拓扑结构,优先恢复重要负荷供电。

4.2 预测性维护与主动防御。设备健康度评估与预警。利用大数据分析变压器油温、绝缘子泄漏电流等参数,预测绝缘老化、设备过热等潜在风险,提前生成维护计划。太赫兹光谱分析技术定量识别变压器绝缘油劣化程度,结合模糊熵算法量化故障等级。预测性维护调度。基于历史故障数据优化巡查路线,减少无效巡检次数,人力成本节约达30%以上。

4.3 智能资源调度与自动化恢复。维修资源优化配置。物联网平台实时监测维修人员位置与技能,动态派遣空闲团队至故障点,响应效率提升40%。自动化电力流调整。AI集成SCADA系统,自动启动备用电源或切换供电路径,减少人工干预延迟。

4.4 边缘计算与分布式决策。就地快速响应。输电线路分布式故障定位装置内置AI芯片,在故障发生瞬间完成本地信号分析与定位(精度 ± 50 米),避免主站通信延迟。边缘计算终端部署轻量化CNN模型,实现短路、过载等故障的毫秒级识别与隔离。高频采样与暂态录波。采用1024点/周波的高频采样技术,捕捉故障暂态波形特征,支持远程召测录波文件辅助修复决策。

5 远程召测与故障分析在电力系统中的应用

5.1 核心应用场景与技术实现。实时数据采集与传输。通过高频采样技术(如1024点/周波)实现电流、电压等参数的毫秒级采集,捕捉暂态波形特征,为故障诊断提供高精度数据支撑。部署智能数据测控终端,内置工业级CPU与LINUX系统,集成传感器数据(油温、油位、声音等)并通过5G/工业以太网实时上传至中心平台。故障录波与远程召测。支持全波形故障录波功能,记录故障前后完整电气量变化,通过云端平台实现远程召测和分析,减少现场人员介入需求。结合边缘计算终端,在本地预处理故障录波文件(如信号滤波、特征提取),降低数据传输带宽压力并提升响应速度。智能诊断与决策支持。基于AI算法(如深度学习、模糊逻辑)对召测数据自动分析,精准识别短路、过载、绝缘劣化等故障类型,误判率低于5%。数字孪生平台对故障场景进行三维重构,仿真拓扑调整方案并生成优先级修复策略(如负荷转移、备用电源投切)。

5.2 关键技术支撑。多模态数据融合。整合SCADA监测数据、红外热成像、声音传感器等多源信息,消除单一数据偏差,提升故障定位精度至 ± 50 米。云边协同架构。云端平台集中存储历史故障案例库,边缘端执行轻

量化AI模型推理,实现“本地快速响应+全局策略优化”的闭环控制。5G通信增强。利用5G大带宽特性实时传输4K/8K超高清视频与三维点云数据,支持运维专家远程查看设备细节(如电弧灼痕、绝缘子裂纹)。

6 电力系统故障诊断与智能修复技术未来发展趋势

6.1 多模态数据融合与全息感知能力提升。多源传感器协同:集成无人机红外热成像、声音传感器、振动监测等多维度数据,结合改进的注意力机制(如CBAM模块),提升复杂环境下微小故障识别精度(如锈蚀检测精度突破90%);量子传感技术突破:研发光纤量子电流传感器,实现微秒级故障电流捕捉能力,检测灵敏度较传统设备提升2-3个数量级;时空关联建模:构建电网设备全生命周期数据图谱,融合历史运行数据与环境参数,建立故障传播时空演化模型。

6.2 AI算法范式演进与自进化能力。混合驱动模型普及:融合物理机理模型与数据驱动方法,通过迁移学习动态适配新能源场站场景,解决小样本学习难题(如风电变频器故障诊断准确率提升至95%);类脑神经网络应用:基于脉冲神经网络(SNN)开发毫瓦级低功耗诊断芯片,实现变电站就地部署的实时故障推理;强化学习自主优化:训练深度Q网络(DQN)自动迭代修复策略,在数字孪生环境中完成百万次仿真训练后,策略优化效率较人工规则提升60%。

6.3 预测性维护与主动防御体系构建。设备寿命动态预测:基于变压器油溶解气体色谱数据构建LSTM-TCN混合模型,提前30天预测绝缘劣化风险并生成维护序列;电力电子设备健康管理:采用IGBT结温在线监测技术,结合开关暂态波形分析,实现换流阀老化状态实时评估;韧性电网时空优化:开发全网协同预防控制算法,通过动态调整储能出力与负荷分配,将极端天气下

停电范围缩小50%。

6.4 边缘智能与分布式协同体系。光子计算终端部署:开发集成光子芯片的智能终端,算力密度达10TOPS/W,支持就地完成暂态故障信号特征提取与分类;联邦学习跨域共享:构建省级电力公司间的联邦学习框架,在不共享原始数据前提下联合训练故障诊断模型,模型泛化能力提升25%;无人机集群自主修复:应用群体智能算法实现50+无人机协同作业,自主完成线路清障、绝缘子更换等高危操作。

6.5 数字孪生与虚实闭环验证。超实时仿真技术:基于异构并行计算架构,将千万节点级电网的电磁暂态仿真速度提升至实际系统的10倍;故障推演孪生引擎:开发电网脆弱性时空推演系统,模拟连锁故障传播路径并自动生成最优解列策略;元宇宙协同运维:构建基于XR技术的沉浸式运维空间,支持专家远程操控机器人完成海底电缆等复杂场景修复。

6.6 新型电力系统适配创新。宽频域故障检测:研制200kHz高频采样装置,精准捕捉新能源并网引起的次/超同步振荡特征;虚拟同步机协同控制:开发具备惯量模拟能力的分布式电源控制器,将新能源场站故障穿越成功率提升至99.5%;氢电耦合修复系统:部署氢储能应急电源车组,在电网黑启动时提供秒级响应的清洁能源支撑。

总之,电力系统故障诊断是电力系统相关的重要研究内容。其中的智能化技术包括电力系统仿真,先进故障诊断算法,先进故障诊断设备等技术。

参考文献

- [1]张鹏,输电线路接地故障诊断方法研究,2022.
- [2]朱宏宇,电力系统故障诊断与智能修复技术的研究与应用探讨,2023.