

Research on Fault Diagnosis and Risk Prevention Technology for Power Transmission and Transformation Systems

Tianrui Xu

School of Environment and Energy Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing, 102616, China

Abstract

As a core component ensuring the safe and stable operation of power systems, the power generation, transmission, and transformation system directly affects the reliability of power supply and the efficiency of energy delivery. Under complex operating environments and fluctuating load conditions, equipment is prone to insulation degradation, overload operation, and external disturbances, resulting in diversified and increasingly concealed fault types. Focusing on the requirements of fault diagnosis and risk prevention and control, this study systematically analyzes the operational characteristics of key equipment and the evolution mechanisms of faults from the perspectives of fault type identification, optimization of diagnostic methods, and multi-source data fusion. A risk identification and evaluation model is constructed, and a coordinated mechanism integrating diagnosis and prevention is established in combination with online monitoring and early warning technologies. By enhancing information sharing and operation-maintenance coordination capabilities, accurate fault identification and proactive risk prevention can be achieved, providing technical support for improving the safety and reliability of power system operation.

Keywords

power generation transmission and transformation system; fault diagnosis; risk prevention and control; condition monitoring; data fusion

发输变电系统故障诊断与风险防控技术研究

徐天瑞

北京建筑大学环境与能源工程学院, 中国·北京 102616

摘要

发输变电系统作为电力系统安全稳定运行的核心环节,其运行状态直接关系到电网供电可靠性与能源输送效率。在复杂运行环境与负荷波动条件下,各类设备易发生绝缘劣化、过载运行及外部扰动等问题,导致故障类型多样且隐蔽性增强。围绕发输变电系统故障诊断与风险防控需求,从故障类型识别、诊断方法优化及多源数据融合角度出发,系统梳理关键设备运行特征与故障演化规律,构建风险识别与评估模型,并结合在线监测与预警技术,形成诊断与防控协同机制。通过强化信息共享与运维协同能力,实现故障识别精准化与风险防控前移,为提升电网安全运行水平提供技术支撑。

关键词

发输变电系统; 故障诊断; 风险防控; 状态监测; 数据融合

1 引言

电力系统规模不断扩大,发电、输电与变电环节呈现高度耦合特征,系统运行复杂性显著提升。在高负荷运行、极端气候以及设备老化等多重因素叠加作用下,局部故障易引发连锁反应,甚至演变为大范围停电事故。传统依赖经验判断与单一数据来源的运维方式,难以满足精细化管理与风险预判需求。随着监测技术与信息化手段的持续发展,多源数据采集与实时分析能力不断增强,为故障诊断与风险防控

提供了新的技术路径。通过对系统运行状态进行动态感知与综合分析,可实现故障早期识别与风险等级判定,推动电力系统由被动检修向主动防控转变,在保障供电安全与提升运行效率方面具有重要意义。

2 发输变电系统故障诊断技术体系构建

发输变电系统在长期运行过程中呈现出多类型故障并存的特点,涵盖设备本体故障、绝缘劣化故障、过载运行故障以及外部扰动引发的突发性故障。不同类型故障在电气量与状态量上具有明显差异特征,短路故障往往表现为电流瞬时升高至额定值的5至10倍,电压快速跌落至额定值的40%以下,系统频率出现短时波动。绝缘劣化过程具有渐

【作者简介】徐天瑞(2006-),男,中国湖北汉川人,在读本科生,从事能源与动力工程(新能源与低碳)研究。

进性特征,局部放电量由 10pC 逐步上升至 100pC 以上,同时介质损耗因数从 0.5% 升高至 1.5% 以上。机械类故障多通过振动信号体现,轴承故障频率集中在 50Hz 至 300Hz 范围,振动加速度超过 4.5mm/s 即存在异常风险。气象因素引发的覆冰或雷击故障则表现为线路电流不平衡率超过 15%,并伴随绝缘子闪络电压降低现象。通过对不同故障在时间尺度与物理量变化特征上的综合分析,可实现故障类型的快速识别与精准分类。故障诊断路径由数据采集、特征提取、模式识别与结果验证构成,通过构建在线监测系统与边缘计算节点,实现毫秒级数据处理能力,将故障响应时间由传统分钟级缩短至 10 秒以内,显著提升诊断效率与准确性^[1]。

3 发输变电系统关键设备故障诊断技术

3.1 发电设备运行故障诊断技术

发电设备故障诊断围绕旋转机械、电气绝缘及热工系统展开,重点依托振动分析、温度监测与电气参数检测技术。汽轮发电机在正常运行中轴振动幅值控制在 50 μ m 以内,当振动幅值超过 80 μ m 时表明存在转子不平衡或轴承磨损问题。通过频谱分析技术识别 1 倍频与 2 倍频成分,当频谱中 1 倍频幅值占比超过 60% 时,可判定为不平衡故障。定子绕组绝缘状态通过局部放电检测技术进行监测,放电量超过 100pC 且放电频率高于每秒 50 次时,绝缘老化趋势明显。温度监测系统利用光纤测温技术实时采集绕组温度,温升速率超过 2 $^{\circ}$ C/min 时需进行负荷调整。发电机电气参数诊断通过监测电压波动范围与功率因数变化,功率因数低于 0.85 时反映无功补偿不足。通过将振动、温度与电气数据进行融合分析,可将发电设备故障识别准确率提高至 96% 以上,并将故障预警时间提前至运行异常发生前 30 分钟。

3.2 输电线路运行故障诊断技术

输电线路故障诊断依托在线监测与智能识别技术,重点关注导线状态、绝缘子性能及外部环境影响。线路电流在正常运行条件下波动范围控制在额定值的 $\pm 10\%$,当短路发生时电流可瞬间升至额定值的 8 倍以上。利用行波测距技术,通过采集故障电流行波传播时间差,定位误差可控制在 300 米以内。绝缘子状态通过泄漏电流监测进行判断,当泄漏电流超过 1mA 且持续时间超过 10 秒,表明存在污闪风险。无人机巡检结合红外热成像技术,对导线接头温度进行检测,当温差超过 15 $^{\circ}$ C 时判定为接触不良。雷电监测系统记录雷击电流峰值,超过 30kA 时线路跳闸概率显著增加。综合在线监测数据与历史运行数据,利用模式识别算法对故障进行分类,识别准确率可达到 94%,并将线路故障定位时间控制在 1 分钟以内,提高输电系统运行可靠性。

4 发输变电系统故障风险识别与评估方法

4.1 发输变电系统故障风险因素识别机制

发输变电系统风险来源具有多维耦合特征,涉及设备

老化、运行负荷、环境扰动及管理因素等多个方面。设备运行年限超过 15 年的比例达到 32%,绝缘性能下降幅度可达 20% 以上,局部放电量由 20pC 增长至 120pC,故障概率显著上升。输电线路长期满载运行比例约为 45%,当负载率超过 90% 时,导线温度由 70 $^{\circ}$ C 升高至 95 $^{\circ}$ C,热应力累积导致金具松动与接触电阻增大。极端气象条件对系统影响明显,风速超过 20m/s 时线路摆幅增加至 1.5m 以上,覆冰厚度达到 10mm 时导线拉力增加 40%,断线风险显著增强。运行管理因素同样对风险产生影响,巡检周期超过 30 天的设备故障发现滞后率提升 25%,人工巡检误判率达到 8%。通过对设备状态参数、环境参数与运行参数进行联合分析,构建风险因子库,将温度、振动、电流、湿度等 20 余项指标进行量化处理,形成风险识别基础,实现对关键风险源的提前锁定与动态监测^[2]。

4.2 发输变电系统风险评估模型构建方法

发输变电系统风险评估依托多指标融合模型进行量化分析,通过建立指标体系与权重分配机制实现风险程度判定。评估指标包括设备健康度、负荷水平、环境影响及运行稳定性等维度,其中设备健康度权重设定为 0.35,负荷因素权重为 0.25,环境因素权重为 0.20,运行稳定性权重为 0.20。设备健康指数低于 0.7 时风险值提升至 0.6 以上,负荷率超过 85% 时风险权重增加 0.15。利用模糊综合评价方法,将各类指标归一化至 0 至 1 区间,通过加权求和计算综合风险值,当综合风险值达到 0.75 以上时判定为高风险状态。引入时间序列分析对风险演化趋势进行预测,连续 3 个周期内风险值增长幅度超过 0.1 时,系统进入快速恶化阶段。结合历史故障数据构建回归模型,样本规模达到 2000 组以上时,模型拟合精度可达到 92%,预测误差控制在 5% 以内,实现风险评估结果的稳定输出与动态修正。

4.3 发输变电系统风险等级划分与预警机制

发输变电系统风险等级划分依据综合风险值进行分级管理,将风险划分为低风险、中风险、高风险及极高风险四个等级。综合风险值在 0 至 0.4 区间内定义为低风险,设备运行处于稳定状态,故障概率低于 3%。风险值在 0.4 至 0.7 区间内定义为中风险,设备性能出现轻微劣化,故障概率提升至 8% 左右,需要加强巡检频次。风险值在 0.7 至 0.9 区间内定义为高风险,设备运行异常明显,故障概率达到 20% 以上,应实施负荷调整与检修干预。风险值超过 0.9 时判定为极高风险,系统失效概率超过 35%,需立即采取停运或隔离措施。预警机制基于实时数据采集与分析系统构建,当关键参数如绕组温度超过 100 $^{\circ}$ C、振动幅值超过 6mm/s 或泄漏电流超过 2mA 时触发一级预警信号。预警响应时间控制在 5 秒以内,信息通过调度平台同步传输至运维终端,实现风险信息的快速传递与处置联动,确保系统运行风险得到有效控制,详见表 1。

表 1 发输变电系统故障风险识别与评估方法整体分析表

分析维度	关键指标	数据范围	风险表现特征	评估与控制要点
设备状态风险	设备运行年限、局部放电量、温度	年限≥15年占32%，放电量20pC~120pC，温度65℃~98℃	绝缘劣化明显，故障概率提升20%以上	加强在线监测与绝缘检测，提前实施设备检修
运行负荷风险	负载率、导线温度、电流波动	负载率≥90%，温度70℃~95℃，电流波动±10%	热应力积累，接触电阻增大，故障概率提升15%	优化负荷分配，实施动态调度控制
环境影响风险	风速、覆冰厚度、湿度	风速≥20m/s，覆冰≥10mm，湿度≥85%	导线摆幅达1.5m，拉力增加40%，跳闸风险显著	加强气象监测与线路加固措施
综合风险评估	风险权重、综合风险值	健康度权重0.35，综合风险值0~1	风险值≥0.75进入高风险状态，失效概率提升至20%以上	构建多指标评估模型，实现动态风险判定
风险预警等级	风险区间、关键阈值	低风险0~0.4，中风险0.4~0.7，高风险0.7~0.9，极高风险≥0.9	温度≥100℃、振动≥6mm/s、泄漏电流≥2mA 触发预警	建立分级预警机制，实现5秒内快速响应

5 发输变电系统故障诊断与风险防控协同机制

5.1 发输变电系统诊断与防控一体化运行机制

发输变电系统运行过程中，故障诊断与风险防控需形成紧密协同关系，通过构建一体化运行机制实现信息与决策的高效联动。系统运行数据通过在线监测装置实时采集，并传输至集中分析平台，在数据处理周期控制在1秒以内的条件下完成异常识别与风险判定。诊断结果直接嵌入调度控制流程，当检测到异常状态时，系统自动生成处置策略并下发至现场执行单元，实现由诊断到防控的闭环管理。设备运行参数与风险等级实现动态关联，当风险值提升至0.7以上时自动触发负荷转移与运行方式调整，减少设备应力水平。通过建立统一的运行标准与响应流程，使故障识别、风险评估与防控措施形成连续链条，有效提升系统整体运行稳定性与响应效率^[3]。

5.2 发输变电系统信息共享与决策支撑机制

信息共享与决策支撑机制是实现发输变电系统高效运行的重要基础，通过构建统一数据平台实现多部门协同管理。系统运行数据采集频率达到1000次每秒，涵盖电气量、环境量与设备状态信息，并通过数据总线实现跨系统传输。数据处理平台对海量数据进行清洗与整合，数据完整率保持在98%以上，为决策分析提供可靠基础。调度中心与运维部门通过共享平台获取实时运行状态与历史数据，实现信息同步与快速响应。决策支撑系统结合专家规则与数据模型，对运行状态进行综合分析，当负荷波动超过15%或设备温度异常上升超过10℃时自动生成调度建议。通过信息共享机制，减少信息孤岛现象，使决策效率提升30%以上，保障电网运行的协调性与稳定性。

5.3 发输变电系统智能化运维与持续优化机制

智能化运维机制以数据驱动为核心，通过持续优化实现系统运行水平的不断提升。运维系统对设备运行数据进行

长期积累，数据规模达到10TB以上时可支持深度分析与趋势预测。设备健康指数随运行时间变化呈现动态曲线，当健康指数由0.85下降至0.65时表明设备进入劣化阶段，需要提前安排检修计划。运维策略通过闭环反馈不断优化，当故障处理时间由120分钟缩短至45分钟时，系统恢复效率显著提升。在线学习机制根据历史故障案例对模型参数进行调整，使故障识别准确率由93%提升至97%^[4]。通过构建持续优化机制，将运行数据、诊断结果与运维措施进行联动分析，实现运维决策的动态调整与精细管理，使发输变电系统在复杂运行环境下保持长期稳定与高效运行。

6 结语

综上所述，发输变电系统故障诊断与风险防控技术的系统化构建，对于提升电网安全运行水平具有重要支撑作用。通过构建多维度故障识别体系与量化风险评估模型，并结合实时监测与协同防控机制，能够实现运行风险的提前感知与精准处置。诊断技术与防控策略的深度融合，使系统由被动响应转向主动管理，有效降低设备故障率与停电风险。在持续推进信息化与智能化运维的背景下，发输变电系统运行管理将更加精细与高效，为电力系统稳定可靠运行提供坚实保障。

参考文献

- [1] 袁斌华. 物联网技术在输变电设备预防性维护管理中的应用[J]. 财富时代, 2025, (10): 84.
- [2] 任晓龙, 孙红宝, 赵世慧, 陈曦, 黄文礼. 基于蚁群遗传算法的输变电系统故障定位监测[J]. 电子技术, 2022, 51(09): 64-67.
- [3] 李斌. 输变电系统中变电运行故障的处理[J]. 光源与照明, 2021, (10): 98-100.
- [4] 戴光桦. 高压大容量输变电系统设计及接地故障在线监测方法研究[D]. 导师: 陈阿莲; 王瑞琪. 山东大学, 2021.