

新能源并网下变电一次设备智能检修技术

刘耀东 郑蕊 赵成业

内蒙古华电锡林浩特新能源有限公司 内蒙古 锡林浩特 026000

摘要: 新能源大规模并网使电网呈现出力波动、潮流双向流动、谐波干扰突出等特征, 变电一次设备损耗加速、隐性故障多发, 传统检修模式弊端凸显。本文围绕新能源并网工况, 系统阐述变电一次设备运行问题, 剖析智能感知、AI 诊断、状态评估、智能决策等核心智能检修技术。结合实际工程试验验证技术应用成效, 分析现存短板并提出优化方向, 可为新能源电网设备运维提质增效提供技术参考。

关键词: 新能源并网; 变电一次设备; 智能检修技术

引言: 双碳背景下风电、光伏新能源并网规模持续扩大, 彻底改变传统电网稳定运行状态, 变电一次设备长期处于负荷波动、谐波干扰、电压不稳的复杂工况, 故障风险大幅提升。传统定期、事后检修模式难以适配新型运维需求, 存在过检、漏检、运维效率低等问题。为解决上述痛点, 智能化检修成为电网运维转型核心方向。本文针对性研究新能源并网下变电一次设备智能检修关键技术, 助力电网安全稳定高效运行。

1 新能源并网下变电一次设备运行特性及检修问题

1.1 新能源并网电网运行核心特征

(1) 风电、光伏并网的间歇性与波动性特征。风电、光伏属于典型的间歇性新能源电源, 出力受光照、风速、天气环境影响极大, 具有随机性、波动性特点。新能源大规模并网后, 电网电源侧出力稳定性显著下降, 整体运行工况波动频繁。(2) 电网潮流双向流动与工况动态变化特点。传统电网以单向集中输电为主, 新能源分布式接入配电网与输电网后, 局部区域发电功率可超越负荷需求, 造成潮流反向流动, 电网运行方式频繁切换, 动态特性显著增强。(3) 新能源并网带来的电网谐波与电压波动问题。风电、光伏系统大量采用电力电子变流设备, 运行过程中易产生谐波、无功扰动, 造成电网电能质量下降。同时新能源出力骤升骤降, 易引发母线电压偏移、波动, 增加电网稳态运行控制难度。

1.2 核心变电一次设备运行特性分析

(1) 变压器设备负荷波动与绝缘老化特性。新能源功率频繁扰动使变压器长期处于变负荷、热循环波动状态, 绕组温升反复变化, 加速绝缘介质老化、脆化, 极易产生潜伏性绝缘缺陷, 缩短设备服役寿命。(2) 断路器、隔离开关频繁动作运行特性。为平抑电网波动、保

障系统安全, 断路器与隔离开关需要频繁开展分合闸操作, 设备机械传动结构磨损加剧、触头电弧烧蚀严重, 机械可靠性与电气耐受性能持续下降。(3) GIS 设备、母线等设备异常工况特征。长期谐波干扰与电压波动易造成 GIS 内部电场畸变, 诱发局部放电、内部过热等隐患; 母线在频繁冲击电流作用下易出现接头过热、电流分布不均等异常, 设备故障风险显著提升^[1]。

1.3 传统变电设备检修模式及弊端

(1) 定期检修模式的流程与应用特点。定期检修以固定周期开展拆解检查、试验维护, 流程规范、管理简单, 能够批量排查常规隐患, 适用于工况稳定的传统电网设备运维。(2) 故障事后检修模式的局限性。事后检修属于被动运维方式, 仅在设备故障跳闸、缺陷暴露后开展维修, 易造成电网停运损失, 无法提前规避设备隐患, 整体运维风险较高。(3) 传统检修适配新能源并网工况的核心短板。传统检修模式依赖固定周期与经验判断, 无法适配新能源场景下设备波动运行、隐性故障多发、损耗加速的特点, 普遍存在过检修、漏检修、检修针对性不足等问题。

2 新能源并网下变电一次设备智能检修关键技术

2.1 设备多源状态信息智能感知技术

(1) 高精度传感器部署与状态数据采集技术。针对变压器、断路器、GIS、母线等核心变电一次设备, 依托高精度温度、振动、局部放电、电流电压传感器, 搭建全覆盖感知网络。结合新能源并网设备波动运行特点, 针对性采集设备温升、机械振动、绝缘损耗、谐波畸变、负荷变化等关键状态数据, 突破传统采集精度低、数据维度单一的问题, 保障原始运行数据的真实性、准确性, 为后续智能分析提供基础数据支撑。(2) 无线传

输与远程实时监测技术应用。采用 5G、物联网、LoRa 等无线传输技术,替代传统有线传输模式,解决变电站设备布局复杂、布线难度大的问题。可实现设备运行数据的远距离、低延迟实时传输,工作人员无需现场值守,即可远程掌握设备实时工况,适配新能源电网工况动态变化快、隐患突发率高的运行特点^[2]。(3)多源异构运行数据融合预处理技术。新能源并网场景下,设备监测数据存在类型繁杂、格式不一、冗余噪声多的问题,包含结构化电力数据与非结构化振动、图像数据。该技术可对多源异构数据进行清洗、降噪、归一化预处理,剔除无效异常数据,整合碎片化信息,提升数据质量,为 AI 诊断、状态评估提供标准化数据支撑。

2.2 基于 AI 的设备故障智能诊断技术

(1)深度学习故障识别模型构建原理。依托海量设备正常运行、轻微故障、严重故障样本数据,构建卷积神经网络、循环神经网络等深度学习模型。通过模型对设备运行数据的特征自动提取、训练学习,挖掘负荷波动、谐波干扰下设备故障的隐性特征,摆脱传统诊断依赖人工经验的局限,实现故障的自动化、智能化识别。(2)设备故障知识图谱与模式匹配诊断技术。整合变电一次设备常见故障类型、诱因、故障特征、处置方案等专业知识,搭建标准化设备故障知识图谱。将设备实时运行数据特征与图谱内故障模式进行精准匹配,快速对应故障类型与故障成因,解决新能源工况下设备故障诱因复杂、难以判定的难题,提升故障诊断的规范性与准确率。(3)谐波、负荷异常诱发故障的精准诊断方法。针对新能源并网特有谐波干扰、负荷频繁波动引发的设备故障,针对性构建专属诊断逻辑。通过分析谐波畸变率、负荷突变幅度与设备绝缘老化、机械磨损、局部放电故障的关联规律,精准区分常规故障与新能源工况诱发的特殊故障,避免误诊、漏诊,实现故障精准溯源与判定^[3]。

2.3 设备健康状态评估与寿命预测技术

(1)设备健康度量化评估指标体系构建。结合新能源并网设备运行特性,摒弃传统单一指标评估模式,从电气性能、机械性能、绝缘性能、运行工况四个维度,筛选负荷波动幅度、谐波耐受度、绝缘损耗率、动作频次等核心指标,建立标准化、量化的健康评估指标体系,全面覆盖设备运行风险点。(2)多参数融合动态健康评估模型。依托大数据算法融合各类监测参数,搭建动态健康评估模型,可根据电网工况变化、设备运行损耗实时更新健康评分。相较于传统静态评估,该模型可精准反映设备在频繁波动工况下

的隐性损耗与健康衰减趋势,实现设备健康状态的动态、全方位研判。(3)变电一次设备剩余使用寿命预测技术。基于设备历史运行数据、实时健康状态、故障损耗规律,结合新能源并网工况的损耗加速特性,通过机器学习算法拟合设备老化衰减曲线,精准预测变压器、断路器、GIS 等核心设备的剩余使用寿命,为预防性检修、设备更替提供科学依据。

2.4 智能检修决策与优化技术

(1)检修风险等级分级判定机制。结合设备健康评分、故障隐患严重程度、设备运行重要度以及新能源电网运行风险,建立多级检修风险判定标准。对设备隐患进行分级分类,区分轻微隐患、一般故障、重大风险故障,明确不同风险等级的处置优先级,规避盲目检修带来的安全隐患与资源浪费。(2)智能化检修方案自动生成技术。依托设备故障诊断结果、健康评估数据与风险等级,系统可自动匹配对应检修流程、检修工艺与质检标准,一键生成标准化、个性化智能检修方案。替代传统人工拟定方案模式,大幅缩短检修筹备时间,适配新能源电网快速消缺的运行需求^[4]。(3)检修资源与检修时序优化策略。综合考量电网运行负荷、新能源发电时段、设备检修优先级、人力物资资源配置情况,优化检修时序与资源分配。错峰开展检修作业,避免检修工作与新能源高发出力时段冲突,合理调配检修人力、设备、物资,在保障电网安全稳定运行的前提下,最大化提升检修效率、降低运维成本。

3 新能源并网下变电一次设备智能检修技术应用验证与效果分析

3.1 工程应用场景与试验方案设计

(1)新能源并网变电站工程概况。本次试验选取某地区 110kV 新能源汇集变电站,站内接入总装机容量 200MW 的光伏与风电机组,年均新能源渗透率达 65%。该变电站主变负荷日波动幅度可达 40%,年均电压波动次数超 120 次,谐波畸变率最高达 5.2%,设备长期处于复杂波动工况,传统检修模式漏检、滞后问题突出,具备典型试验研究价值。(2)试验设备选取与试验环境搭建。试验选取站内 2 台 110kV 主变压器、4 组 GIS 间隔、8 台高压断路器为核心试验设备,全覆盖布置温度、局部放电、振动等智能传感器共计 56 个。搭建 5G+ 物联网传输监测平台,数据采集频率设定为 1 次/秒,可实时同步设备运行、电网谐波、负荷波动等多维度数据,构建贴合新能源并网实际的试验环境。(3)对比试验思路与评价指标设定。采用新旧模式对照试验,以传统定期检修、事后检修为对照组,智能检修技术为试验

组。设定量化评价指标,包含故障诊断准确率、预警提前时长、单次检修耗时、年均检修成本、设备故障停运时长、电压稳定合格率六项核心指标,保障试验结果客观可量化。

3.2 智能检修技术实操应用流程

(1) 设备状态实时监测与数据采集实施。通过全域部署的高精度传感器,全天候采集设备温升、机械振动、局部放电、线路电流电压及电网谐波数据,依托5G无线传输技术实现数据毫秒级上传。系统自动完成数据清洗与归一化处理,每日可有效采集存储数据超86万条,剔除3%左右的干扰噪声数据,保障数据精准有效。(2) 故障诊断与健康状态评估实操过程。将预处理后的多源数据导入深度学习诊断模型与健康评估体系,模型自动提取设备运行特征,匹配故障知识图谱完成智能诊断。同时从绝缘、机械、电气多维度量化设备健康分值,分值区间0-100分,低于60分判定为设备亚健康状态,实现隐性故障精准识别与健康状态动态更新。(3) 智能检修方案落地与现场实施流程。系统根据设备故障类型、健康等级及电网运行工况,自动分级判定检修风险,生成定制化检修方案。工作人员结合现场工况优化检修时序,避开新能源发电高峰时段,完成设备消缺、维护作业,检修完成后同步录入数据,形成监测-诊断-决策-运维的闭环检修流程^[5]。

3.3 应用效果对比分析

(1) 故障诊断准确率与预警时效性对比。试验数据显示,传统检修模式故障诊断准确率仅72%,无提前预警能力;智能检修技术故障诊断准确率可达98.3%,可提前24~72小时预判设备隐性故障,彻底解决传统检修滞后、误诊漏诊的问题。(2) 检修效率、检修成本量化对比分析。相较于传统检修模式,智能检修单次作业时平均缩短38%,年均检修作业时长减少420余小时。同时减少过度检修作业,年均运维耗材、人力成本降低26.5%,大幅缩减变电站运维开支。(3) 设备运行稳定性提升效果验证。技术应用后,站内变电一次设备年均故障次数由11次降至2次,设备非计划停运时长缩减85%,电网电压合格率由95.1%提升至99.7%,有效适配新能源并网波动工况,大幅提升电网运行稳定性。

3.4 技术应用现存问题与优化方向

(1) 复杂工况下智能检修技术应用短板。在极端雷雨、高温酷暑天气及新能源大幅弃发、负荷骤变的极端复杂工况下,环境干扰数据增多,模型诊断准确率会下降5%~8%。同时针对多设备联动诱发的复合型故障,技术溯源与诊断能力仍存在不足。(2) 算法模型与现场适配性优化方向。现有算法模型多基于常规故障样本训练,针对新能源谐波、负荷波动诱发的新型故障样本储备不足。后续需持续扩充极端工况、特殊故障样本数据库,迭代优化深度学习算法,提升模型对复杂工况故障的适配与识别能力。(3) 智能检修体系完善改进思路。现阶段智能检修多聚焦单设备独立检测,缺乏多设备联动状态研判机制。未来需搭建全站设备协同监测检修体系,融合电网调度、新能源出力数据,构建全域一体化智能运维体系,进一步提升新能源并网下变电站检修智能化水平。

结束语

本文梳理了新能源并网下变电设备运行特性与传统检修弊端,详解系列智能检修关键技术,工程实践证明该技术可大幅提升故障诊断准确率、降低运维成本、增强电网稳定性。同时指出复杂极端工况下技术存在的适配短板。后续需扩充特殊故障样本、迭代优化算法模型,搭建全站协同智能运维体系,持续完善智能检修技术体系,助力新型电力系统高质量建设。

参考文献

- [1] 张可,田焱,段晓雪,等.智能变电站故障检修系统运维技术研究[J].电网与清洁能源,2022,35(10):56-61.
- [2] 何光亮,李进中,丁欣.浅析电网变电运维技术与管理[J].山东工业技术,2024,18(24):194-196.
- [3] 李军,王浩.光伏电站接入对变电站一次设备的影响及对策[J].电力工程技术,2025,11(2):56-61.
- [4] 张磊,刘敏.新能源并网下变电一次设备智能检修技术研究[J].高压电器,2024,23(8):178-184.
- [5] 王艳,赵伟.大数据驱动的变电一次设备故障预测与智能检修[J].电力系统保护与控制,2024,10(15):123-129.