

高压电气设备绝缘故障诊断方法分析

石团太

哈密科能电力技术服务有限公司 新疆 哈密 伊吾 839304

【摘要】：高压电气设备绝缘故障是引发电网运行安全事故的重要诱因，故障类型与演化路径复杂，常规诊断方法误判、漏判风险较高。对过热性、放电性、受潮性三类绝缘故障的外在表现特征进行分类梳理，明确不同诱因对应的故障演化规律，逐一界定预防性试验、在线监测、带电检测三类常规诊断方法的适用场景与实操短板，最终从多方法协同校验、诊断结果量化评级、故障响应全流程闭环三个维度给出故障诊断的优化实施路径。

【关键词】：高压电气设备；绝缘故障；故障诊断；多方法协同；运维响应

DOI:10.12417/2705-0998.26.08.054

引言

高压电气设备是电力传输链路中的核心载体，其运行稳定性直接决定区域供电可靠性。当前电网装机容量与电压等级持续提升，设备运行工况复杂程度大幅增加，绝缘故障的发生概率随之升高，故障排查处置不及时极易引发大面积停电、设备烧毁等安全事故，造成严重的经济损失与社会影响。现有绝缘故障诊断体系多依赖单一检测方法，存在缺陷识别精度不足、诊断结果与实际运维需求脱节等问题，无法适配新型电力系统建设背景下的高可靠性供电管控要求。从故障诱因识别、诊断方法适用性分析、诊断路径优化三个层面开展系统性研究，能够为绝缘故障的精准识别、高效处置提供可行参考，切实降低设备运维成本，提升电网运行安全水平。

1 高压电气设备绝缘故障的典型诱因识别

1.1 常规绝缘故障的表现特征梳理

开展常规绝缘故障的核心类型梳理工作，把过热性、放电性以及受潮性三类故障的外在参数变化特征进行逐一整理。过热性故障的核心表现为设备运行过程中油温持续超出额定阈值，绝缘油的色谱组分出现异常偏移，同时设备壳体的局部温度会出现同步偏高的情况，部分严重故障还会伴随绝缘介质的色泽明显变深。放电性故障的核心表现为局部放电信号的持续产生，放电过程中形成的特高频信号幅值随故障发展逐步提升，部分接触不良诱发的放电故障还会伴随轻微的设备异响。受潮性故障的核心表现为绝缘电阻数值持续下降，介质损耗因数的测试结果超出正常区间，同时绝缘油的微水含量也会出现明显升高，三类故障的差异化特征能够为后续的初步故障判定提供直观的参照标准。

1.2 不同诱因下的故障演化规律总结

借助变压器、断路器以及GIS等典型高压设备的历史运行数据，开展不同诱因下的故障演化规律总结工作，为后续的诊断方法选型提供基础支撑。绝缘老化诱发的故障发展速度较为平缓，从初期参数异常到完全绝缘失效的周期通常在数月数年不等，影响范围大多局限在设备的单一绝缘单元，不会快速

波及周边附属部件。外力破坏诱发的故障发展速度极快，通常在数小时到数天内就会从局部损伤发展为整体绝缘失效，影响范围会根据外力破坏的程度存在较大差异，严重时会导致整套设备停运。环境干扰诱发的故障发展速度随环境条件变化出现波动，降水以及高温等极端环境下故障演化速度会明显加快，影响范围大多集中在设备直接接触外部环境的外层绝缘结构。

2 高压电气设备绝缘故障的常规诊断方法适用性分析

2.1 预防性试验诊断方法的适用场景界定

开展绝缘电阻测试、介质损耗因数测试、直流泄漏电流测试等主流预防性试验的技术原理以及操作流程的梳理工作，把每类试验的操作步骤、注意事项以及核心技术参数进行逐一明确，划定各类试验对应的检测精度阈值。契合现行预防性试验规范的各项要求，逐一界定不同试验方法对应的适配设备类型、适宜使用工况以及固有检测盲区。介质损耗因数测试更适宜在停运状态下对电力电容器的绝缘缺陷进行检测，能够有效识别受潮类早期故障，但是对于局部微小放电缺陷的检测灵敏度偏低。绝缘电阻测试更适用于初步排查设备整体受潮或者贯穿性缺陷，直流泄漏电流测试能够更精准反映高压作用下的绝缘劣化情况，能够为运维人员基于现场实际工况选用合适的预防性试验方法提供实用参考。

2.2 在线监测诊断方法的精度影响因素分析

开展油色谱在线监测、局部放电在线监测、铁芯接地电流在线监测等主流在线监测技术的运行逻辑梳理工作，明确各类监测技术的参数采集频次、采集范围以及误差允许范围等标准要求。结合现场干扰抑制相关技术要求，分析现场电磁环境、传感器安装位置、数据传输链路稳定性三类核心因素对监测结果精度的影响规律。特高频局部放电在线监测容易受到现场移动通讯信号的干扰，出现误报警问题，传感器安装位置偏差超过允许范围时，会极大程度上降低局部放电信号的采集精度，数据传输链路受环境干扰出现丢包时，会导致监测结果出现偏

差,能够为在线监测系统的日常运维以及参数优化提供明确的调整方向。

2.3 带电检测诊断方法的实操局限性梳理

开展红外测温检测、特高频带电检测、超声波带电检测等主流带电检测技术的操作要求梳理工作,明确各类检测方法的适用场景以及优势特性。结合现场运维的实际作业场景,逐一梳理各类带电检测方法存在的实操局限性。红外测温检测容易受到环境温度、阳光直射、设备表面污秽的影响,对于设备内部深埋的绝缘缺陷检测精度偏低,同时对检测人员的操作经验要求较高。特高频带电检测容易受现场杂散电磁信号干扰,无法对密封性能较差的设备内部缺陷进行精准定位,超声波带电检测对低能量放电缺陷的识别灵敏度不足,能够为后续带电检测方法的优化应用提供精准的切入点。

3 高压电气设备绝缘故障诊断方法的优化应用路径

在完成高压电气设备绝缘故障典型诱因识别以及常规诊断方法适用性分析的基础上,结合当前绝缘故障诊断工作中存在的误判率高、结果与运维脱节等实际问题,从多方法协同、结果量化、流程闭环三个维度开展绝缘故障诊断方法的优化应用路径设计工作,切实提升绝缘故障诊断的准确性以及实用性,为高压电气设备的运维工作提供可靠支撑。

3.1 多诊断方法的协同校验机制构建

鉴于单一预防性试验、在线监测以及带电检测方法均存在固有检测盲区以及误判可能性,首先开展多诊断方法协同校验基本逻辑的梳理工作,把不同工况下主辅诊断方法的选型规则进行逐一明确。针对设备常规运维巡检工况,把在线监测的实时数据作为核心判定依据,搭配固定周期开展的带电检测结果进行定期校验,一旦在线监测数据出现异常偏移,马上补充对应点位的专项带电检测工作,初步锁定异常大致范围;针对设备预试定检工况,把常规预防性试验的测试结果作为核心判定依据,搭配同周期开展的带电检测以及近3个月的在线监测数据进行交叉验证,避免单次试验操作误差导致的误判问题;针对设备故障后的溯源排查工况,同时调用历史在线监测数据、历次带电检测记录以及最近一次预防性试验的结果进行综合分析,同时搭配故障后的专项检测结果完成最终判定。引入《电力设备在线监测与故障诊断》课程中的典型故障诊断逻辑,开展110kV油浸式变压器绝缘故障诊断的方案设计工作,把油色谱在线监测数据作为初步异常识别的核心依据,一旦监测到绝缘油色谱组分出现偏离正常阈值的情况,马上开展对应设备的特高频带电检测工作,确认局部放电缺陷是否真实存在,同时排除外部电磁干扰导致的在线监测数据误报问题,最终在设备停电检修阶段,开展介损测试以及停电局部放电试验,精准确认缺陷的具体位置以及严重程度。对于断路器、GIS等其他类型的高压电气设备,也可以参照该逻辑匹配对应的主辅诊断方

法组合,例如针对GIS设备的绝缘故障诊断,可以把特高频在线监测数据作为初步识别依据,搭配超声波带电检测进行验证,最终通过停电后的局部放电试验确认缺陷情况,进一步扩大多方法协同校验机制的适用范围,切实降低单一诊断方法的误判概率。

3.2 诊断结果的量化评级体系搭建

首先开展不同诊断方法获取的各类参数阈值的梳理工作,结合电力行业标准中关于绝缘故障的等级划分要求,搭建包含轻微异常、一般缺陷、严重缺陷、危急缺陷四个等级的诊断结果量化评级体系,把每个等级对应的参数异常幅度以及故障演化风险进行逐一明确。针对轻微异常等级,对应各类诊断参数的偏离幅度不超过正常阈值的10%,且不存在持续劣化的趋势,故障演化风险极低,不会影响设备的正常运行;针对一般缺陷等级,对应各类诊断参数的偏离幅度在正常阈值的10%到30%之间,存在缓慢劣化的趋势,故障演化风险较低,短时间内不会引发设备停运问题;针对严重缺陷等级,对应各类诊断参数的偏离幅度在正常阈值的30%到80%之间,存在较为明显的持续劣化趋势,故障演化风险较高,随时可能发展为影响设备正常运行的故障;针对危急缺陷等级,对应各类诊断参数的偏离幅度超过正常阈值的80%,或者已经出现明显的故障外在特征,故障演化风险极高,随时可能引发设备安全事故。在此基础上,开展不同评级结果对应的运维响应优先级的划定工作,针对轻微异常等级的诊断结果,只需要在后续的运维巡检以及检测工作中对异常参数进行重点跟踪,不需要调整现有运维计划;针对一般缺陷等级的诊断结果,需要在最近一次的预防性试验或者停电检修作业中对缺陷进行核实以及处理,不需要额外安排专项停电作业;针对严重缺陷等级的绝缘故障,需要在72小时内安排停电检修,避免缺陷进一步恶化引发设备停运事故;针对危急缺陷等级的绝缘故障需要马上停运设备,第一时间开展缺陷排查以及处理工作,避免故障扩大引发的安全风险,保障诊断结果能够直接匹配运维决策需求,大幅提升运维工作的针对性以及效率,减少不必要的运维资源投入。

3.3 故障预警的闭环响应流程设计

鉴于当前绝缘故障诊断结果与运维响应存在脱节的问题,首先开展全流程闭环响应机制的设计工作,覆盖异常信号采集、多方法协同校验、缺陷等级评定、运维指令下发、检修结果反馈五个核心环节,把每个环节的操作要求以及衔接规则进行逐一明确。首先开展异常信号采集环节的规范制定工作,要求在线监测、带电检测以及预防性试验获取的所有异常参数都要第一时间录入统一的诊断台账,明确信息录入的责任主体,避免异常信息遗漏导致的故障处置延误;其次开展多方法协同校验环节的流程制定工作,要求所有异常信号都要借助至少两类不同的诊断方法进行交叉验证,确认异常信号的真实性,排除检测误差导致的误报问题,减少不必要的运维作业投入;接

下来开展缺陷等级评定环节的标准执行工作,严格依托搭建的量化评级体系完成缺陷等级的划分,明确等级评定的核对要求,避免人为判定的主观性偏差,保障等级评定结果的一致性;之后开展运维指令下发环节的责任落实工作,根据缺陷等级对相应匹配的响应优先级,第一时间把运维指令下发到对应的责任班组,明确处理时限以及作业要求,避免责任不清导致的处置延误;最后开展检修结果反馈环节的规则制定工作,要求检修工作完成后,把故障的真实类型、产生缘由、处理结果等信息完整录入诊断台账,确保所有故障处置信息都有完整记录。同时搭建诊断结果的迭代优化通道,把实际检修获得的故障真实情况反向输入诊断模型,定期开展诊断方法参数阈值以及评级标准的调整优化工作,不断降低误判以及漏判的概率,持续提

升绝缘故障诊断的准确率,最终实现绝缘故障预警响应的全流程可追溯、可优化,切实保障高压电气设备的运行安全。

4 结语

高压电气设备绝缘故障的精准诊断是电网运维管控环节的核心工作,适配不同工况的诊断方法组合能够最大限度提升缺陷识别的准确性,降低误判、漏判风险。量化的缺陷评级体系与闭环的故障响应流程,能够实现诊断结果与运维决策的直接衔接,大幅提升故障处置的针对性与效率,减少不必要的运维资源投入。后续可结合不同区域的电网运行特性,对诊断方法组合、评级阈值进行针对性调整,进一步扩宽适用场景,为高压电气设备的安全稳定运行提供长效支撑。

参考文献:

- [1] 贾学瑞.高压电气设备状态检修技术研究[J].电力设备管理,2024,(24):48-50.
- [2] 张晋波,李可萌,叶哲,孙正可,袁欢,杨爱军,李黎明,王小华,荣命哲.基于姿态角与速度曲线的高压隔离开关故障诊断[J].高压电器,2025,61(06):32-42+51.
- [3] 王洁.2022款大众ID.6X车绝缘故障诊断与分析[J].汽车维护与修理,2025,(23):22-23.
- [4] 贾学瑞.高压电气设备状态检修技术研究[J].电力设备管理,2024,(24):48-50.
- [5] 张晋波,李可萌,叶哲,孙正可,袁欢,杨爱军,李黎明,王小华,荣命哲.基于姿态角与速度曲线的高压隔离开关故障诊断[J].高压电器,2025,61(06):32-42+51.
- [6] 王洁.2022款大众ID.6X车绝缘故障诊断与分析[J].汽车维护与修理,2025,(23):22-23.