

变电设备寿命评估与状态检修策略研究

王立

国网山西省电力有限公司超高压变电分公司 山西 太原 030032

摘要: 随着我国电力系统规模的持续扩大和智能化水平的不断提升,电网的安全、稳定、经济运行对变电设备的可靠性提出了前所未有的高要求。传统的定期检修(TBM)模式因其固有的盲目性和资源浪费问题,已难以适应现代电网精益化管理的需求。状态检修(CBM)作为一种以设备实际健康状态为决策依据的先进运维模式,已成为保障电网安全、提升资产全寿命周期管理水平的核心方向。本文旨在系统性地探讨变电设备寿命评估与状态检修策略的关键技术与应用路径。首先,深入剖析了影响变压器、断路器、互感器等核心变电设备寿命的关键因素;其次,构建了融合多源信息的综合寿命评估模型,并详细阐述了基于油色谱分析、局部放电检测、红外热成像等技术的状态监测体系。研究表明,通过精准的使用寿命预测与科学的状态检修,能够有效延长设备服役周期、规避突发故障风险、优化检修资源配置,从而实现电网资产价值的最大化。

关键词: 变电设备; 寿命评估; 状态检修; 状态监测

引言

电力是国民经济命脉,变电站作为连接发电、输电与配电的关键枢纽,其设备健康状况关乎电网可靠性与稳定性。变电设备投资大、结构复杂、服役环境严苛,故障会造成经济损失甚至大面积停电,威胁公共安全。长期以来,我国电力系统采用固定周期预防性定期检修模式,虽保障了电网安全,但“一刀切”弊端凸显,存在过度检修浪费资源、引入新隐患,以及检修不足致设备突发故障等问题。这种被动粗放运维方式制约了电网发展。在此背景下,以设备健康状态为驱动的状态检修理念成为趋势,其核心是精准评估剩余寿命、把握健康状态。因此,科学准确评估变电设备寿命并制定检修策略是关键问题,本文将展开系统研究。

1 变电设备失效模式与寿命影响因素分析

变电设备的寿命并非一个简单的物理时间概念,而是指其在特定运行条件下,能够持续、安全、可靠地执行其设计功能的时间长度。设备的失效通常是多种因素长期、共同作用的结果。深入理解各类设备的失效机理,是进行寿命评估的基础。

1.1 电力变压器

变压器是变电站的核心设备,其寿命主要受绝缘老化的影响。其中,热老化是最主要的寿命终结因素。根据蒙辛格(Montsinger)规则,变压器绝缘纸(板)的热老化速率随温度呈指数增长,热点温度每升高6-8°C,其预期寿命约缩短一半。长期过负荷运行、冷却系统故障或设计裕度不足均会加速这一不可逆的化学过程。除了热应力,电老化同样构成重大威胁,它由局部放电、沿

面放电或突发的过电压冲击引起,这些现象会持续侵蚀绝缘材料,形成导电通道,最终可能导致灾难性的绝缘击穿。此外,短路电流产生的巨大电力会使绕组发生永久性变形或位移,破坏其精密的绝缘结构,从而同时削弱其电气和机械强度。不容忽视的是,水分侵入和油中杂质污染会显著降低绝缘油和固体绝缘的整体介电性能,并催化油纸绝缘的老化反应,油中产生的糠醛等老化产物正是这一过程的直接证据。

1.2 高压断路器

高压断路器的寿命主要体现在其机械和电气性能的渐进式衰退上。在其数万次的分合闸操作生涯中,操动机构内部的连杆、轴承、弹簧等关键部件不可避免地会发生疲劳、磨损和微小变形,这些累积效应会直接反映在操作特性的偏离上,例如分合闸时间延长、速度下降或三相不同期,严重时甚至会导致拒动或误动,丧失其保护功能。与此同时,每一次开断故障电流都是一场严峻考验,触头间产生的高温电弧会熔焊、喷溅并烧蚀触头材料,使得接触电阻不断增大,进而引发异常温升,形成恶性循环^[1]。对于主流的SF6断路器而言,灭弧介质本身的劣化也是关键因素,气体中的微水含量一旦超标,便会在电弧作用下生成具有强腐蚀性的氟化氢等副产物,侵蚀内部金属和绝缘元件;而对于真空断路器,维持高真空度是其开断能力的根本保证,任何导致真空度下降的因素都将直接危及设备安全。

1.3 电流/电压互感器

电流/电压互感器的失效模式与其具体类型密切相关,呈现出多样化的特点。对于传统的油浸式互感器,其老

化机理与电力变压器高度相似,主要面临绝缘油和固体绝缘因热、电、水分等因素导致的老化与受潮问题。特别是末屏接地不良,会诱发局部放电,成为加速绝缘劣化的隐秘杀手。相比之下,SF₆气体绝缘互感器的关注焦点则转移到了气体本身的状态上,SF₆气体的纯度、压力以及至关重要的微水含量是其健康与否的核心指标,而密封系统的可靠性直接决定了这些参数能否长期稳定。随着技术的发展,电子式互感器的应用日益广泛,其寿命特性也随之改变,更多地受限于内部光学器件、传感元件及各类电子元器件的自然老化过程,这类设备对电磁兼容性和环境温度变化也表现出更高的敏感性。

综上所述,变电设备的寿命是一个复杂的多物理场耦合过程,受到电气应力、热应力、机械应力、环境应力等多种因素的交互影响。单一指标难以全面反映其真实状态,必须采用多维度、多源信息融合的方法进行综合评估。

2 基于多源信息融合的综合寿命评估模型

针对上述复杂的寿命影响机制,本文提出一种分层递进的综合寿命评估模型,该模型将设备的理论寿命、历史运行数据和实时状态信息有机结合,以期获得更为精准和动态的寿命预测结果。

2.1 理论寿命基准

评估的起点是确立一个可靠的基准。以新设备投运时的理想初始状态为参照,依据IEEE C57.91、IEC 60076等国际权威标准,并紧密结合设备自身的具体设计参数,如额定容量、绝缘等级和冷却方式等,可以利用经典的寿命模型(例如Montsinger方程)计算出其在理想工况下的理论预期寿命 L_0 。这个理论值虽然在现实中难以达到,但它为后续结合实际运行情况进行动态修正提供了一个不可或缺的锚点。

2.2 运行历史修正因子

设备的实际服役生涯远非理想状态所能描述。为了量化真实世界中的各种应力对寿命的消耗,必须深入挖掘其历史运行数据。通过接入SCADA系统积累的海量历史记录,可以对热、电、机械等关键应力进行回溯性分析。例如,利用动态热路模型或简化的工程算法,可以根据精确的历史负荷曲线反演出绕组热点温度的完整历史轨迹,并通过积分计算得出等效的热老化运行时间^[2]。同样,统计设备在整个生命周期中所承受的过电压事件(包括次数、幅值和持续时间)以及开断短路电流的严酷程度,可以构建相应的电应力损伤模型。对于断路器这类机械动作频繁的设备,记录其总的操作次数以及分析分合闸线圈的电流波形特征,则能有效评估其内部机械部件的

累积磨损状况。通过这些精细化的修正因子,我们可以得到一个充分考虑了历史运行影响的修正寿命 L_{hist} ,使其更贴近设备的真实老化水平。

2.3 实时状态健康指数(HI)

如果说历史数据描绘了设备的过去,那么实时状态信息则揭示了它的现在,并指向未来。这是评估设备当前健康水平和预测剩余寿命最为关键的一环。通过在设备上部署先进的在线监测装置,可以持续获取那些能够敏锐反映设备内部物理化学变化的特征参量。这些原始数据经过归一化和加权处理后,被整合为一个介于0到1之间的量化指标——健康指数(Health Index, HI),其中HI=1代表设备处于全新状态,HI=0则意味着设备已完全失效。HI的计算既可以采用基于专家经验的加权评分法,也可以借助机器学习模型从数据中自动学习权重。其输入信息源极为丰富,涵盖了油色谱分析(DGA)所提供的H₂、CH₄、C₂H₂等特征气体浓度及其产气速率,这是诊断变压器内部潜伏性过热或放电故障的金标准;油中糠醛含量,作为与绝缘纸聚合度(DP)高度相关的直接指标,是评估固体绝缘老化程度的利器;局部放电(PD)的放电量、重复率及相位分布特征,能有效定位和表征绝缘系统的薄弱环节;介质损耗因数(tanδ)与电容量的变化,则反映了绝缘整体受潮或普遍性劣化的趋势;红外热像技术则擅长于发现由接头松动或接触不良引起的异常温升等外部热缺陷;而对于充气设备,SF₆气体的压力、密度、微水含量及其分解产物的监测同样是不可或缺的。最终,综合寿命评估模型将这三重信息融为一体,通过一个非线性函数来描述当前健康状态对剩余寿命的动态影响,从而克服简单线性外推的局限性,尤其是在设备进入加速劣化阶段时,能够发出更为准确的预警。

综合寿命评估模型可表述为:

$$L_{\text{remaining}} = (L_{\text{hist}} - t_{\text{operated}}) \times f(\text{HI})$$

其中, t_{operated} 为设备已运行时间, $f(\text{HI})$ 是一个非线性函数,用于描述当前健康状态对剩余寿命的影响。当HI较高时, $f(\text{HI})$ 接近1,剩余寿命主要由历史消耗决定;当HI急剧下降时, $f(\text{HI})$ 会快速衰减,表明设备可能进入加速劣化阶段,剩余寿命远低于线性外推结果。

3 变电设备状态监测与诊断技术体系

精准的寿命评估依赖于高质量、多维度的状态信息,这需要构建一个覆盖全面、层次分明且技术互补的状态监测与诊断技术体系,形成从感知到认知的完整链条。

3.1 在线监测技术

在线监测构成了整个体系的基石,它能够提供连续、实时的数据流,使运维人员得以全天候掌握设备的脉搏。

现代变电站正逐步集成多功能的在线监测单元,例如针对变压器的综合监测系统,能够同步采集油色谱、油温和绕组温度、套管介损及电容量、铁芯接地电流乃至局部放电信号;对于高压断路器,则重点监测其分合闸线圈的电流波形、行程-时间特性、储能电机的工作状态以及SF₆气体的压力、密度和微水含量;而对于CVT、耦合电容器等容性设备,通过对末屏电流的精密监测,可以实时计算出其介损和电容量的变化趋势。这些在线数据为设备的常态化健康评估提供了坚实的数据基础。

3.2 带电检测技术

在线监测虽好,但其测点和精度仍有局限。带电检测技术作为其有力补充,能够在设备保持运行状态下进行更为深入和灵活的“体检”。运维人员可以定期或在接到在线告警后,使用便携式仪器开展高频或超声波局部放电检测,以精确定位放电源的位置;运用红外精确测温技术,对设备进行全面的热扫描,发现那些隐蔽的、尚未引起保护动作的热缺陷;在特定场合下,紫外成像技术还能有效捕捉到肉眼不可见的电晕放电现象^[3]。这种“线上+线下”的组合拳,极大地提升了状态感知的深度和广度。

3.3 离线试验与数据分析

尽管状态检修强调减少不必要的停电,但定期的离线预防性试验依然扮演着不可替代的角色。诸如绝缘电阻、直流电阻、交流耐压试验等传统项目,能够对设备的绝缘强度和导电回路进行一次全面的“压力测试”。关键在于,不能孤立地看待这些离线数据,而应将其与在线监测数据、带电检测结果以及设备的运行日志进行深度关联和交叉印证,从而形成一幅关于设备状态的完整、立体的画像,避免因单一数据源的偏差而导致误判。

3.4 智能诊断技术

面对由上述多层次技术体系汇聚而成的海量、异构、高维的监测数据,传统的阈值告警和人工经验分析已显

得力不从心。必须引入人工智能技术进行深度挖掘和智能诊断。通过模式识别算法,如支持向量机(SVM)或神经网络,可以对复杂的油色谱数据进行自动解析,精准识别出故障的具体类型;利用时间序列分析模型(如ARIMA)或长短期记忆网络(LSTM)等先进的预测算法,能够对关键特征量的未来演化趋势进行科学预测,实现从“事后告警”到“事前预警”的跨越;更进一步,通过构建设备故障-征兆-原因的知识图谱,可以将专家的宝贵经验固化为可计算的知识库,辅助现场人员进行快速、准确的综合研判,显著提升诊断的效率和准确性^[4]。

4 结语

本文聚焦变电设备寿命评估与状态检修策略关键技术,构建融合多源信息的综合寿命评估模型,建立以健康指数为核心的量化状态评价体系,提出基于油色谱分析、局部放电检测、红外热成像等技术状态监测体系。未来,研究将聚焦数字孪生技术深度融合,构建高保真数字孪生体,为寿命预测和检修决策提供强大仿真推演能力;深化大数据与人工智能应用,挖掘设备劣化规律,提升寿命预测精度与鲁棒性;开发能根据外部因素动态调整检修计划的智能决策引擎,实现检修效益全局最优。随着新技术涌现,变电设备状态检修将更精准、智能、自主,助力新型电力系统构建与“双碳”目标实现。

参考文献

- [1]沈琦,衡怡彤.变电运维中电气设备绝缘老化评估与寿命预测方法研究[J].技术与市场,2025,32(10):49-53+58.
- [2]蒋伟,虞思媛.基于多物理场耦合的输变电设备性能评估与寿命预测[J].电气技术与经济,2024,(09):379-381.
- [3]李兴,吴剑锋.电力变电设备状态检修方法应用[J].科学技术创新,2025,(23):93-96.
- [4]原显达,王金龙,佟智宇,等.电网输变电设备智能化及状态检修措施要点分析[J].电子元器件与信息技术,2025,9(09):76-78.