

变电站一次设备故障预测与检修方法分析

徐晓兵

(国网湖北省电力有限公司黄冈市罗田县供电公司, 湖北 黄冈 438600)

摘 要 在维护电网整体安全方面, 变电站一次设备构成了电力系统发挥决定性作用的重要基石。在实际运行过程中, 受设备自然老化机制和外部环境多重因素叠加影响, 各类潜在故障时有发生。为最大限度降低故障对电网运行的冲击, 需建立精准高效的故障预警和维护体系。本文探讨了变电站一次设备故障预测与检修的重要性, 分析了相关的故障预测方法, 并提出一种变电站一次设备的故障预测与维修方法, 旨在为提升设备的可靠性和电网运行的稳定性提供借鉴。

关键词 电力系统; 变电站; 一次设备; 故障预测; 检修方法

中图分类号: TM73

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.30.018

0 引言

变电站一次设备作为电力系统的一部分, 它的关键装置包括变压器、断路器以及隔离开关等。为了确保电力系统安全稳定运行, 对这些故障隐患设备实现前瞻性预判和适时维护至关重要。构建一套高效的故障预警和检修管理体系, 能有效降低故障对电网的冲击程度。因此, 相关人员需要针对变电站一次设备故障的预测方法加强研究, 通过仪器仪表、在线监测等方式获得数据, 对潜在故障进行预测, 指导检修工作有针对性地开展。

1 变电站一次设备故障预测的重要性分析

变电站一次设备智能一体化程度随着我国经济和科技的不断发展而不断提高, 从而在高压用电的情况下, 能够满足现代人各种用电需要, 对国内电力行业的发展影响是深刻的, 使变电站的工作效率得到提高, 稳定性越来越强。变电站一次设备故障预测, 能够帮助检修人员及时发现电力系统故障问题、消除电力系统运行安全隐患, 同时通过积极探索变电站一次设备故障预测检修, 能够保证电力系统始终处于平稳工作状态。除此以外, 随着变电站一次设备封闭性不断加强, 过去的检修方法难以继续使用, 而故障预测和检修方法是现下最佳的处理方式^[1]。

2 变电站一次设备故障预测的方法

2.1 设备数据整合

2.1.1 辅助仪表

在变电站一次设备体系中, 以变压器、断路器、隔离开关等核心设备为代表, 往往与一系列辅助仪表相配套。这些仪表能够随时对其运行状态进行精准的

反馈与检测。对设备运行故障的判别和判断, 其记录和显示的信息可作为重要依据。如压力表能够实时反映设备内部压力情况, 辅助我们判断是否有过压或欠压的风险; 密度继电器可以监测绝缘介质的密度变化, 以此推断设备的密封性能是否良好; 油温表直接展示了设备关键部位的温度情况, 因为温度异常通常是故障发生的前兆^[2]。

2.1.2 在线监测装置

随着时代快速发展、传感器技术水平越来越高, 如今的电力系统已经具备了强大的实时监测能力。根据变电站一次设备的运行情况, 通过最新的传感网络, 可在线全面实时监控。该技术的应用使一次设备运行参数得到及时的集成和管理, 从而提高了故障预报的针对性。详细来说, 在变电站一次设备在线监测装置中涵盖了监控传感器、计算机中枢、数据库服务器等部分。技术团队按照设备结构与运行特点, 选择变电站一次设备运行中的重点部位和关键环节, 然后在这些位置合理布设传感器装置。

2.1.3 红外监测技术

通常来说, 变电站一次设备在运行时需要承受高电压和大电流的严苛工况。在这种情况下, 设备运行异常或者发生故障, 其内部线路以及各个设备元件易于出现发热状况。而红外技术恰恰能够提供非常有效的手段进行监控。通过红外热成像仪器等设备, 可以直观地针对变电站一次设备运行中的温度变化情况加以实时监督和控制。例如: 假设某个部位的温度上升, 表明该处接触不良、过载; 而温度分布不均表明内部结构有所不足。采用红外监控技术, 在有效预报的同时, 可以对设备运行信息进行实时整合, 及时发现故障隐

患^[3]。这对减少因设备故障而给线路造成的不利影响是有利的,对保证电力系统安全平稳运行是有益的。

2.2 设备故障预测

因为变电站一次设备运行故障受到多种因素影响,通常具有不确定性的特点。这样的不确定性让预测落空具有相当的挑战性。因此,在针对故障进行预测期间,要引入不确定性理论。该理论可以帮助我们对以上整合方式所获取到的数据加以直观分析。为确保设备故障预报准确及时,现特对变电站一次设备运行过程中的隶属度和健康指标两项重要关联参数进行单独设置。其中,定义设备隶属程度为 X ,反映当前设备运行偏离程度相对于正常状态下的运行情况;而设备健康指数则定义为 Y ,它对设备各方面的性能指标进行了综合考虑,是对设备整体健康状况进行量化考核的指标。同时还根据变配电系统内部一次设备运行年限、循环、日常维修状态以及多方面的相关资料对设备故障做出综合判断,对设备的故障进行综合分析。通过对这些因素的综合分析,可以更为准确地把握设备的运行趋势,及时发现潜在故障风险,让故障预测目标得到有效落实。这不仅有助于提高电力系统的可靠性和稳定性,而且在停运损失的情况下,还能为企业节省大量的维护成本。

3 变电站一次设备故障预测与检修方法

3.1 数据采集及预处理技术

实现变电站一次设备故障预报检修的前提条件是准确可靠的监测数据。该研究以变压器、断路器、隔离开关三类变电站一次设备为重点,系统采集了多维度运行指标,包括油中溶解气体、振动、接触电阻等,对设备运行状态进行了全面覆盖。

在资料收集阶段,资料的代表性、完整性等原则都需要严格遵循。对于变压器设备,主要对油中溶解气体的数据进行收集,包括总烃、乙炔、氢气等七种特征气体,以及绕组温度等辅助参数;针对断路器装置,我们重点收集了储能电机工作电流、传动机构的动态电流及分合闸线圈的激励电流等机械特性参数,同时也考虑了开断电流和合闸电阻等电气性能指标。隔离开关的监控主要关注动静触头温度、三相电流的不平衡度等接触状态参数,同时还会综合考虑环境的温湿度变化。

由于原始采集数据有数据缺失或者异常波动的情况,必须要实施有效的数据清洗流程。应针对遗漏数据,以邻期内的数据算术平均数作插值回补;根据相似设备运行规律或关联参数之间的物理关系,对持续时间

较长的空白区域间进行估算和推断^[4]。例如:参考同规格型号变压器历史油中气体数据推算目标设备缺失值,或者基于负载电流曲线反演变压器绕组温度变化趋势。对于离群值的处理,运用孤立森林算法建立异常检测模型,自动识别并剔除因电磁干扰产生的尖峰脉冲以及设备停运期间产生的无效测量值。

在数据标注环节,充分利用设备的历史检修台账信息。将每一项监测数据与其对应的故障事件标签进行匹配,并对其进行监管和学习样本建设。故障标签详细记录了故障发生的具体时间、类型、严重程度等多项属性。依照电力行业规范标准建立故障分类统一编码制度。以变压器绝缘缺陷为例,可分为放电性故障、过热故障、机械损伤三大类,其中放电性故障又细分为特定的表现形式,如局部放电、沿表面的闪络、电晕现象等,其主要表现形式有:经过系统化的数据标注过程,最终形成一套高质量的故障案例库。数据库内包含 10 个主要变电站、3 个涉及主要设备、2 个年度时间跨度监测资料,其中 5 000 例的故障实例和 50 000 例正常运行的样本,数据集规模适中,类别分布均衡,为后续建模提供了坚实的数据基础。

3.2 构建故障预测模型

基于上述准备好的标注数据集,训练用于设备健康状态评估的预测模型。此次选用随机森林算法作为核心算法框架,该算法凭借出色的非线性映射能力和强大的抗噪声干扰特性,在工业设备健康管理领域具有广泛的应用前景。

随机森林属于整合学习范畴,提升整体泛化能力的方法是将多个决策树的预测结果结合在一起。具体而言,即在训练过程中,采用自主抽样法,从原始训练集中随机抽取若干个子样集,对每个子集进行一棵自主训练的决策树。每棵决策树在构建时进一步引入随机性,用于节点分裂的部分特征仅从全部特征中随机选取。这种双重随意性机制,有效防范了单株决策树过于拟合所带来的风险。当进行新样本预测时,将其输入所有已训练好的决策树中,采用投票机制确定最终输出结果。多个决策树的预测结果互相验证,减少了个别判断失误所带来的冲击。

此次研究中的随机森林模型总计有 100 棵决策树,每棵树的最大深度限制为 10 层,叶节点至少包含 5 个样本点。通过网格搜索对超参数组合进行寻优,找到在训练效率与预测精度之间达到平衡的配置方案。

为了增强模型性能,还实施了一系列数据增强技术和特征工程技术。针对类别失衡问题,对少数类样本进行了操作,以增加其数量比例,对训练中缺失的

部分输入特征模拟进行了随机屏蔽,以提高模型的坚固性;利用主要成分分析等方法,排除特征间存在的多个共线性;针对时序型特征,抽取统计量、趋势项、周期性权重等作为新的特征加以表现。

在完成模型训练后,再进行独立测试集上的性能综合测评。实验显示,所提模型在多项评估指标上表现优异,如故障识别精确度达到 95.2%、故障类型分类正确率达到 92.5%、提前 1 个月预测精准度为 93.4%,提前 2 个月预测精准度为 91.7%,提前 3 个月预测精准度为 89.3%。在不同的时间尺度下,故障预测的精准度都较为优秀。

3.3 检修方法优化

差异化的检修计划是根据故障预测结果制定的。传统定期检修模式通常设定固定的检修周期,如年度预防性试验或双年度大修,但这种方式容易导致过度维修或维修不足的问题。为此,本研究提出了以装备实时健康为前提的自适应检修战略:当预测故障概率较高时,为了消除隐患而及时介入检修;相反,为节省成本,检修间隔适当延长。针对不同性质的故障类型和部位特点,匹配相应的专项检查项目,如针对绝缘劣化开展绕组介电强度测试,针对机械磨损实施本体结构探伤检测等。

在实际安排检修任务时,需要综合权衡多种因素:一是由涵盖直接经济损失和社会影响等多个方面的预测概率和潜在后果共同决定的故障风险等级;二是根据其在电网拓扑中所处的位置及承载负荷的大小,按设备的重要程度确定轻重缓急;三是包括人力可用、零部件库存、断电窗口期等因素在内的资源约束。为此构建了多目标优化模型,旨在将故障风险和维修成本最小化,同时满足各种约束条件^[5]。

根据故障预测频率和检修需求紧迫程度,将检修计划分为三个层级,日常应急响应计划针对 24 h 内可能发生的重大突发故障;月度例行检查计划关注未来 1 至 2 个月内逐渐发展的渐进性故障;年度统筹安排则关注全年范围内的系统性检修工作。在计划执行中持续收集反馈信息,用于评估模型预测偏差并动态化调整检修策略,形成闭环管控机制。

4 实验验证与效果分析

为检验所提方法是否有效,此次以某电网公司下属 10 个变电站的真实运行数据开展实证研究。该数据集收录了对三种设备的一年监测记录,分别是变压器、断路器和隔离开关。

数据采集和预处理工作首先要按照 3.1 所述的方

法完成,构建包含 5 000 个样本的故障资料汇编;然后按照 3.2 流程对随机森林预测模型进行训练;最后制定检修计划,并根据 3.3 提出的策略付诸行动。

表 1 显示了故障预测模型在实际应用中的业绩状况。结果显示该模型能够准确捕获大部分潜在故障迹象,尤其对严重故障具有较高的预警准确率,为及时采取干预措施提供了有力支持。

表 1 故障预测模型性能表现

故障等级	预测正确数	预测错误数	准确率
0	3 412	157	95.6%
1	492	98	83.4%
2	187	24	88.6%

在检修策略实施上,对 10 个变电站按故障预测结果制定了 3 级检修计划:周、月、年,对高危重点设备进行优先检修。经过一年的实践应用,相比往年同期数据,这些变电站的设备故障发生率降低了 30%,平均可用率提升了 5%。这一显著提升充分显示了所提出方法在指导变电站一次设备检修工作中的有效性与实用性。

5 结束语

本研究提出了变电站一次设备的故障预测及维修方法,通过综合运用数据分析和机器学习技术,对设备运行数据进行收集和分析,进而构建了故障预测模型,能够准确预测设备故障的风险。在此基础上通过检修方法,优化检修时间和内容。该方法对变电站一次设备故障风险进行准确预测、对检修工作进行准确指导、增强设备可靠性和电网运行稳定性有促进作用。未来,还需要开拓数据源,建立综合的故障数据集,增加故障预测精度,优化机器学习模型,改进检修方法,开发可视化平台,以推动该领域的发展。

参考文献:

- [1] 黄杰. 变电站一次设备运行问题分析及状态检修[J]. 现代工业经济和信息化,2022,12(10):243-244,247.
- [2] 孙文选. 变电一次设备故障检测及检修的探讨[J]. 科技创新与应用,2021,11(26):67-69.
- [3] 张继敏,郑合欢. 变电站设备状态检修方法研究[J]. 办公自动化,2024,29(21):88-90.
- [4] 肖冰. 基于数字孪生技术的变电电气一次设备状态监测与优化设计[J]. 光源与照明,2024(08):189-191.
- [5] 叶咏青,陈竹永,朱明江. 输变电设备状态监测与故障诊断技术分析[J]. 电子技术,2024,53(08):210-211.