

Study on the influence of condition-based maintenance mode on the reliability of substation equipment operation

Xu Chen Dongmei Li

State Grid Heilongjiang Electric Power Co., Ltd. Daxinganling Power Supply Company, Daxinganling, Heilongjiang, 165000, China

Abstract

As the power system continues to develop and improve, the operational reliability of substation equipment is essential for ensuring the stability and safety of power supply. The condition-based maintenance (CBM) model, an advanced maintenance strategy, is increasingly being adopted in the power industry. This paper explores the impact of CBM on the operational reliability of substation equipment, analyzes its principles, advantages, and key technologies, and discusses its significant effects in enhancing the operational reliability of substation equipment. It also looks forward to the future applications of CBM, aiming to provide theoretical support and practical guidance for power companies to better implement CBM.

Keywords

condition maintenance mode; substation equipment; reliability analysis

状态检修模式对变电设备运行可靠性的影响研究

陈旭 李东梅

国网黑龙江省电力有限公司大兴安岭供电公司, 中国·黑龙江 大兴安岭 165000

摘要

随着电力系统的不断发展和完善, 变电设备的运行可靠性对于保障电力供应的稳定性和安全性至关重要。状态检修模式作为一种先进的检修策略, 正逐渐在电力行业中得到广泛应用。本文深入研究了状态检修模式对变电设备运行可靠性的影响, 分析了状态检修模式的原理、优势以及实施过程中的关键技术, 探讨了其在提高变电设备运行可靠性方面的显著效果, 并对状态检修模式的应用前景进行了展望, 旨在为电力企业更好地实施状态检修提供理论支持和实践参考。

关键词

状态检修模式; 变电设备; 可靠性分析

1 引言

电能是国民经济的重要组成部分, 变电设备是电力系统的重要组成部分, 变电设备的工作状况对供电质量和供电可靠性有很大的影响。传统的定期检修方式存在着检修次数过多、突发故障预测困难等不足, 难以满足现代电力系统对变电设备高可靠运行的要求。状态检修模式通过实时监控和数据分析等手段, 对设备的健康情况进行精确的评估, 并据此制订出一套科学的检修计划, 能够有效地克服传统检修模式的弊端, 为提高电力系统的工作可靠性提供重要的保证。

2 状态检修模式对变电设备运行可靠性的影响

状态检修是基于电力系统的实际运行情况, 对设备进行实时或定期的监控, 获得设备的状态信息, 并将其与设备

的历史数据、运行环境等因素相联系, 利用科学的分析手段与故障诊断技术, 对其进行评价, 并据此制订出适当的检修对策, 决定检修的时间与内容。

2.1 提高设备故障诊断的准确性

状态检修模式能够利用在线监测装置和带电检测技术等先进的监测技术和设备, 实现对变电设备运行状态的实时、准确获取。例如, 通过对变电设备进行油色谱分析、局部放电监测, 并对开关装置的触头温度和机械特性进行监测, 就可以发现潜在的故障风险。与传统的检修方式相比, 这种方式可以更全面、更深入地掌握设备的运行状况, 从而提高故障诊断的准确性, 并能有效地防止由于判断错误造成的误修或漏修^[1]。

2.2 减少设备的不必要检修

传统的定期检修方式通常是按一定的检修周期来进行, 并没有考虑到设备的实际工作状况, 这使得部分正常运转的设备需要经常进行检修, 这样会加快设备的损耗, 缩短设备的使用寿命。状态检修模式是基于设备的状态评价结果, 仅

【作者简介】陈旭(1987-), 中国辽宁庄河人, 本科, 工程师, 从事变电检修研究。

在设备发生异常或者具有潜在故障风险的情况下进行检修，对运行状况较好的设备，可以适当延长检修时间，减少设备的非必要检修，将由于检修造成的损坏的危险减小，从而提升设备的可靠性和寿命。

2.3 降低设备故障发生率

状态检修模式通过对设备进行科学的分析与评价，可以对设备的早期故障进行诊断，从而对其发展趋势进行预测。工作人员能够依据这些信息，预先制订出预防措施和检修方案，以便在故障还没有发展到严重程度时就加以解决，这样就能有效地防止设备故障的进一步扩展，减少设备的失效概率，增强变电设备的运行可靠性。比如，对某些绝缘不甚严重的设备，应加强监控，并及时采取应急措施，预防其进一步恶化，从而防止设备发生短路、跳闸等重大事故。

2.4 提高设备的可用率

状态检修模式以设备运行状况为基础，可有效地防止因常规检修方式造成的过度检修及不必要的停电，有效降低非计划停运次数，从而提高设备利用率。使装置能够长期处于运行状态，这也是保证电力系统安全可靠的重要保证。此外，状态检修模式还能对检修方案进行优化，并对设备的检修时间进行合理安排，将对电力系统的冲击降到最低，从而使设备的利用率和可靠性得到进一步的提升。

3 110kV 变电设备状态检修关键技术

3.1 设备状态监测技术

3.1.1 电气量监测技术体系构建

电气量监测作为设备运行状态的基础表征手段，其技术架构已从传统模拟量采集升级为数字化监测网络。在110kV变电站中，基于IEC61850标准构建的合并单元(MU)实现了电压、电流等电气量的同步采样，采样率可达每周波256点(对应10kHz采样频率)，满足故障暂态过程的波形捕捉需求。以110kV主变电设备为例，其配置的0.2S级电流互感器在10%额定电流至120%额定电流范围内，复合误差控制在0.2%以内，配合电子式电压互感器(EVT)的分压电容分压技术，实现了全量程范围内的高精度电气量监测。

3.1.2 非电气量多维监测技术创新

光纤传感温度场监测系统在110kV油浸式变电设备油箱壁及绕组内部部署分布式光纤传感器(DTS)，采用拉曼散射原理实现温度场的实时监测，空间分辨率达1米，测温精度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。声振耦合监测技术针对110kV断路器的机械状态监测，采用三向加速度传感器(量程 $\pm 50\text{g}$ ，频率响应0.5Hz~10kHz)与超声波传感器(带宽40kHz~100kHz)的阵列式布局，通过时频联合分析提取分合闸过程的机械特征参数。微水与气体状态监测网络在110kV GIS设备各气室部署集成式传感器单元，采用傅里叶变换红外光谱(FTIR)技术实现SF₆气体分解产物(SO₂、H₂S等)与微水的同步监测，检测精度达1 $\mu\text{L/L}$ ^[2]。

3.1.3 绝缘状态智能监测技术突破

超高频-超声波联合局放监测创新采用内置式超高频传感器(频段300MHz~3GHz)与外置式超声波传感器(频段20kHz~100kHz)的协同监测方案，通过时差定位算法实现110kV GIS设备局放源的三维定位，定位误差 $< 10\text{cm}$ 。宽频介损谱分析技术采用扫频介损测试仪对110kV变电设备绕组进行0.1mHz~1000Hz全频段扫描，通过扩展德拜模型拟合得到极化谱参数，建立绝缘老化特征量与聚合度(DP)的映射关系。

3.1.4 油液状态多参量监测系统

气相色谱-质谱联用分析升级传统油色谱分析技术，采用GC-MS联用仪实现14种特征气体(含C₂H₂、CO、CH₄等)的同步检测，最小检测浓度达0.05 $\mu\text{L/L}$ ，分析周期缩短至15分钟。油液微粒子在线监测集成激光遮光法与电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)技术，实现变电设备油中金属磨粒(检测粒径 $> 5\mu\text{m}$)与dissolved metal ions(检测限1ppb)的同步监测。

3.2 数据分析与处理技术

3.2.1 多源异构数据融合平台

构建基于边缘-云端协同的监测数据处理架构，在变电站本地部署边缘计算节点(ECU)，实现110kV设备SCADA数据(采样周期1s)、在线监测数据(采样率100Hz)、离线试验数据的实时汇聚与预处理。采用时空对齐算法(时间同步精度 $< 1\text{ms}$)和数据清洗策略(剔除坏值率 $> 5\%$ 的采样点)，建立设备状态数据库。

3.2.2 高级数据分析方法体系

非线性动力学分析引入排列熵(Permutation Entropy)与模糊熵(Fuzzy Entropy)对110kV变电设备油温序列进行复杂性分析，当设备存在潜伏性故障时，熵值从0.7升至1.3，反映系统从有序向混沌状态转变。例如某主变电设备的油温熵值在3天内持续上升，结合油色谱中CO浓度增长(从50 $\mu\text{L/L}$ 升至120 $\mu\text{L/L}$)，提前7天预警了铁芯局部过热故障。

时频域联合特征提取采用小波包变换对110kV断路器振动信号进行多层分解，在分闸过程中提取200~800Hz频段的能量特征向量，正常状态下该向量的欧氏范数为1.2~1.5，当机构出现卡涩时可降至0.8以下。贝叶斯网络动态更新模型基于2000+条110kV设备历史缺陷数据构建贝叶斯网络，采用粒子滤波算法实现网络参数的在线更新。当油色谱中H₂ $> 150\mu\text{L/L}$ 且介损 $> 0.5\%$ 时，模型预测绕组受潮概率为78%，随着新数据的输入，概率值动态调整至85%，经真空干燥处理后绝缘电阻恢复至10000M Ω 以上，验证了模型的预测准确性。

3.2.3 智能预警与可视化系统

开发基于数字孪生的三维状态可视化平台，将110kV变电站设备的实时监测数据映射为虚拟模型的物理特征。

采用热力图显示变电设备温度场分布,当铁芯接地电流超过 100mA 时,虚拟模型对应位置呈现红色预警,并通过 LSTM 神经网络预测未来 7 天的缺陷发展趋势(如接地电流以 0.2mA/天的速率增长)^[9]。

3.3 故障诊断技术

3.3.1 智能诊断技术体系创新

深度卷积神经网络诊断模型构建 12 层的 CNN 模型对 110kV 变电设备油色谱数据进行特征提取,输入层为 14 维气体浓度向量,经 5 层卷积层和 3 层全连接层后,实现 7 类典型故障(低温过热、高温过热、局部放电等)的分类,测试集准确率达 97.2%。

知识图谱驱动的专家系统构建包含 320 种 110kV 设备故障模式、失效机理及检修策略的知识图谱,采用图神经网络(GNN)实现故障知识的推理与更新。当监测到 110kV GIS 盆式绝缘子的超高频局放信号(幅值 600mV,相位特征 $\theta +$ 占比 75%)时,系统通过知识图谱的关联检索,自动匹配缺陷类型为“绝缘子气隙放电”,并推送包括缺陷定位方法、检修工艺、备品备件清单在内的完整解决方案。

数字孪生驱动的故障反演建立 110kV 断路器的多物理场耦合数字孪生模型(机械—电磁—热力学耦合),通过实测分闸时间(85ms)与仿真分闸时间(60ms)的偏差,反演机构参数变化。

3.3.2 混合智能诊断策略优化

提出“阈值预警-模式识别-机理反演”的三级诊断流程,实现从异常检测到故障定位的全流程智能化。首先通过阈值判断(如局放量 $> 100\text{pC}$)触发预警,然后利用 CNN 模型进行故障分类(准确率 96%),最后基于数字孪生模型进行失效机理分析。

3.3.3 诊断结果可信度评估模型

建立基于证据理论的诊断结果不确定性量化模型,综合考虑传感器精度(如油色谱传感器误差 $\pm 5\%$)、数据完整性(采样率 $\geq 95\%$)、模型可靠性(历史准确率 $\geq 90\%$)等 12 项影响因子,输出 0~1 的可信度指标。当 110kV 变电设备的诊断可信度 < 0.7 时,系统自动触发补充检测(如增加油色谱采样频次至 1 次/天),通过该机制能够有效避免因数据噪声导致的误诊断(原诊断为绕组过热,补充检测后确认为冷却系统故障)。

4 状态检修模式的应用前景与挑战

4.1 应用前景

随着电力系统的快速发展以及智能程度的不断提升,

状态检修模式是一种新型的故障诊断方法。在未来,基于物联网、大数据和人工智能等新兴技术的发展,将对设备的状态进行全方位、智能化的监控,使其能够实现对设备的实时监控、对数据的分析和处理的自动化和准确性,对故障的诊断具有重要的意义。本项目的研究成果将进一步拓展到输电线路、配电设备等电力系统运行中,为构建更加智能、可靠和高效的电力系统奠定基础。

4.2 面临的挑战

尽管这种方式有很多的优势,但是在实施的时候却遇到了很多困难。例如,在对设备进行实时监控时,其准确性、稳定性等方面还存在着一些问题,在某些情况下,存在着误报或漏报等情况;为了适应设备运行工况的复杂性和海量的监控数据,必须不断地对数据进行分析 and 处理。状态检修模式是一种由专业人士实施、管理的方式,它对工作人员的技术水平和综合素质有很高的要求,但目前我国电力行业人才结构存在明显短板——基层运维人员中兼具电力设备知识与数据分析能力的复合型人才占比不足 15%,且现有培训体系尚未形成标准化的技能认证机制,缺乏这方面的专业知识和技能^[4]。

5 结语

状态检修模式由于其科学性、合理性和有效性,使得电力系统的运行可靠性得到了很大的提升。通过对设备进行精确的状态监控、数据分析和处理和故障诊断,可以对设备进行实时的检测,从而对设备中存在的一些隐患进行检测,从而减少不必要的检修次数,降低设备的失效率。尽管在实际操作中还存在一定的困难,但是,随着科技的发展和管理水平的提升,这种方式将会越来越多地被运用于电力工业领域,为电力系统的安全、稳定运行提供可靠的保证。电力企业应该大力推行状态检修模式,强化科技研究与人才培养,持续健全状态检修体系,使之与电力系统发展相适应,为社会和经济发展提供可靠的供电保障。

参考文献

- [1] 陆聪.状态检修模式下SF6开关在变电检修中的问题及处理技术分析[J].自动化应用,2024,65(S2):32-33+37.
- [2] 李晓宇.状态检修模式下变电检修关键技术及注意事项分析[J].光源与照明,2024(11):57-59.
- [3] 秦雪,魏蔚.智能电力系统中的变电一次设备运维管理[J].集成电路应用,2023,40(03):128-129.
- [4] 李春雨,刘佳佳.变电系统的状态检修模式分析[J].集成电路应用,2022,39(11):200-201.