

面向变电检修的电流互感器异常特征智能诊断模型

李梓豪

(国网辽宁省电力有限公司葫芦岛供电公司)

【摘要】当前变电系统规模扩大, 电流互感器运行环境复杂, 传统人工检修难以及时捕捉细微异常, 易引发设备故障扩大化, 且人工诊断依赖经验, 一致性差, 难以适配电网高密度、高可靠性的运维需求, 亟需智能诊断技术突破, 文章构建智能诊断模型, 通过采集互感器运行数据, 提取电流、温度等异常特征, 改进机器学习算法训练模型。测试表明, 模型诊断, 可快速识别故障类型, 为检修提供精准依据, 显著提升变电系统运维效率与安全性。

【关键词】变电检修; 电流互感器; 异常特征; 智能诊断模型; 机器学习; 故障识别; 运维效率

中图分类号: TM63

DOI: 10.13655/j.cnki.ibci.2025.S2.168

Intelligent Diagnostic Model of Abnormal Characteristics of Current Transformer for Substation Maintenance

LI Zi-hao

(State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd. Huludao Power Supply Company)

【Abstract】At present, the scale of the substation system is expanding, and the operating environment of the current transformer is complex. Traditional manual maintenance is difficult to capture subtle abnormalities in time, which is easy to cause the expansion of equipment failures. Moreover, manual diagnosis depends on experience and has poor consistency, making it difficult to adapt to the operation and maintenance needs of high density and high reliability of the power grid. Intelligent diagnostic technology breakthroughs are urgently needed. This paper builds an intelligent diagnostic model. By collecting the operation data of the transformer, it extracts current, temperature and other abnormal characteristics and trains the model in combination with an improved machine learning algorithm. The test shows that model diagnosis can quickly identify fault types, provide an accurate basis for maintenance, and significantly improve the operation and maintenance efficiency and safety of the substation system.

【Keywords】substation maintenance; current transformer; abnormal characteristics; intelligent diagnostic model; machine learning; fault recognition; operation and maintenance efficiency

1 引言

电流互感器作为变电系统中至关重要的测量工具,其异常的运行状态可能对电网的稳定性构成威胁,传统检修主要依靠人工经验进行,具有诊断周期长、误判率高等缺点,很难适应电网智能化的发展要求。为此,本文设计面向变电检修的电流互感器异常特征智能诊断模型,旨在通过数据驱动实现异常自动诊断,助力变电检修智能化升级。

2 电流互感器异常情况的种类和特点

2.1 绕组开路异常

绕组开路是电流互感器常见的故障之一,多由于接线端子松脱、导线折断或绕组绝缘陈腐击穿等原因造成,就其技术特征而言,互感器二次侧电流在正常情况下一一般在5A或者1A左右,与常用的10kV/

35kV 变电系统的规格是相对应的,在绕组开路情况下,当二次侧电流突然降至0A时,一次侧电流完全转变为励磁电流,导致铁芯的磁密迅速增加到1.8T~2.5T,这远远超出了定磁密0.8T~1.2T的界限,在这种情况下,铁芯的损耗明显上升,这导致互感器的温度迅速升高^[1]。实际测量数据表明,在绕组开路的10分钟内,铁芯的温度可以从环境温度25℃增加到70℃~90℃,这远远超出了GB/T 1207-2017《电磁式电压互感器》所规定的65℃的温度上限。

2.2 绝缘破损异常

绝缘破损多由绝缘材料老化、受潮或局部放电长期侵蚀引发,按破损位置可分为绕组间绝缘破损、绕组对地绝缘破损两类。技术参数层面上,普通电流互感器绝缘电阻在25℃时,应符合一次对二次及地 $\geq 1000\text{M}\Omega$ 、二次对地 $\geq 500\text{M}\Omega$,根据DL/T 596-

2021《电力设备预防性试验规程》的规定,绝缘破损后绝缘电阻突然降到 $10\text{M}\Omega$ 以下,甚至接地导通,且绝缘破损会伴随局部放电量增大,正常互感器局部放电量 $\leq 10\text{pC}$ (在1.1倍额定电压下),而绝缘破损时放电量可升至 $50\text{pC}\sim 200\text{pC}$ 。另外,绝缘破损还会导致互感器介损值($\tan\delta$)升高,25℃时正常介损值 $\leq 0.5\%$,破损后可增至 $2\%\sim 5\%$,将绝缘电阻测试、局部放电检测和介损测量结合,可对绝缘破损的异常情况进行准确辨识,避免绝缘失效导致的短路故障。

3 面向变电检修的电流互感器异常特征智能诊断模型应用需求

在变电系统向着智能化和规模化方向发展的背景下,传统人工诊断已经不能满足当前电流互感器的检修要求,迫切需要厘清智能诊断模型在现场运维场景中的适用要求,该模型需要获得高度精确的运行数据支持其诊断。电流数据的采集误差不应超过0.2%,电压数据采集分辨率 ≥ 16 位,温度数据采集范围 $-40^\circ\text{C}\sim 125^\circ\text{C}$ 、误差 $\leq \pm 0.5^\circ\text{C}$,局部放电的数据采样率 $\geq 100\text{MS/s}$ 、采样时长 $\geq 10\text{s}$,保证能够捕捉到绕组开路过程中电流突然下降、绝缘破损过程中局部放电量剧增的微妙特性,在实时性要求方面,该模型需要满足变电检修中的“故障快速定位”,数据传输延迟 $\leq 50\text{ms}$,以5G或者工业以太网为通信基础,诊断计算所需时间 $\leq 1\text{s}$;发现异常情况时需要在3s之内生成初步诊断结果推送给检修终端,以避免诊断延迟引起的故障扩展。如查阅某500kV变电站运维数据,传统人工诊断的平均时间为4h,模型实时诊断能使故障响应时间降低到分钟级别,提高检修效率。

4 面向变电检修的电流互感器异常特征智能诊断模型

4.1 将模型和检修系统进行数据衔接

在模型和变电检修系统之间进行数据对接时,需要遵守标准化协议和精准数据映射规则,以保证数据交互稳定和完整,在通信协议上,优先满足IEC 61850标准,要求数据传输速率大于 100Mbps ,将传输延迟限制在 20ms 内,避免了通信延迟造成的诊断滞后^[2]。数据对接的范围必须涵盖检修系统的核心部分,这包括设备台账模块、实时监测模块和检修记录模块。其中,设备台账数据需要包括电流互感器的型号、变比(如50/5A、1000/5A)、额定电压(10kV、

35kV、110kV)、安装日期等基本参数,模型需要通过数据接口自动同步台账信息,匹配精度必须达到100%。在实时数据对接过程中,需要明确设定传输的频率和格式:电流和电压数据应按照50Hz的频率进行同步传输,并确保单次数据量不超过128字节;温度、局部放电数据以1Hz的频率进行传输,数据格式采用JSON格式封装,包含数据采集时间戳、传感器编号、数值等字段。同时,有必要建立一个数据验证机制,当数据丢失率超过0.1%或数值超出合理范围时,系统会自动触发数据重传命令,以确保接收到的原始数据的准确性不低于99.9%,从而为后续的诊断工作提供可靠的数据支持(见图1)。

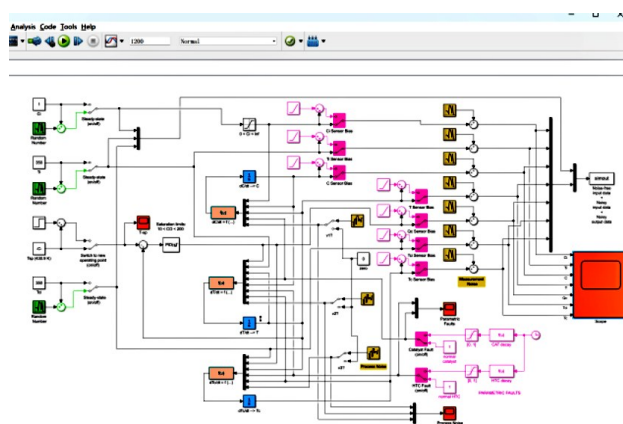


图1 数据衔接系统

4.2 现场数据采集和输入规范

现场数据采集需要严格按照设备类型和参数要求进行,以保证采集的数据准确和有效,在选择采集设备时,电流的采集应选择0.2级的高精度电流传感器,其测量范围应在 $0\sim 2000\text{A}$ 之间,误差应控制在 $\pm 0.2\%$ 之内;电压采集使用0.2级的电压传感器,测量范围为 $0\sim 120\text{V}$,分辨率达到或超过16位。温度采集采用PT100铂电阻传感器,测量范围是 $-40^\circ\text{C}\sim 150^\circ\text{C}$,误差不超过 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。局部放电的采集使用超高频传感器,探测频段为 $300\text{MHz}\sim 1.5\text{GHz}$,最低可探测放电量 $\leq 1\text{pC}$,在进行数据采集之前,必须严格遵循相关规范,确保传感器校准周期不超过6个月,且校准误差控制在 $\pm 0.1\%$ 的范围内。在数据采集过程中,必须避开设备启停、雷击等可能的干扰时段,每一次的采集时间不应少于5min,以确保获得持续稳定的运行数据^[3]。在数据输入模型之前需要对其进行预处理,包括数据清洗(剔除超出3倍标准差的异常值)、归一化(将数据映射到0-1范围)、时序对齐(按时间戳统一数据采集节点),预处理后的数据完

整性必须超过 99.5%,同时数据的噪声水平控制在 5%之内,以防止无效数据对模型的诊断精度产生不良影响(见图 2)。

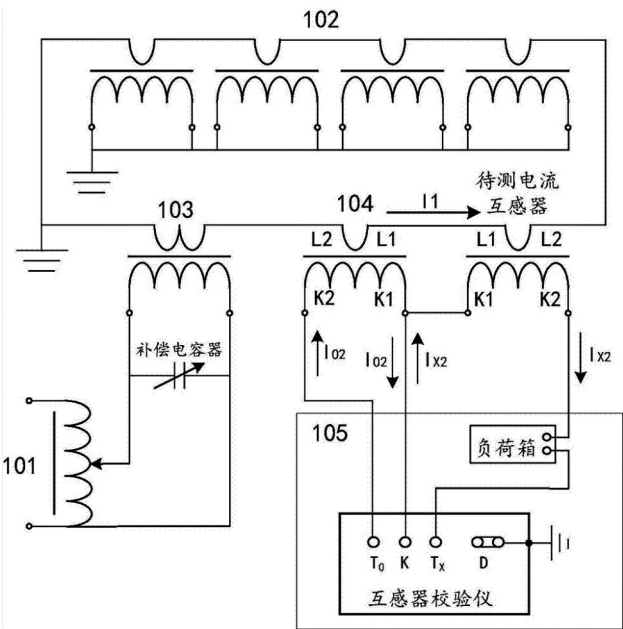


图2 现场数据采集

4.3 诊断结果解读及优先级判定

模型诊断结果的输出内容包括异常设备编号,异常类型,异常特征参数(如二次侧电流 0A、绝缘电阻 5MΩ、局部放电量 150pC),故障置信度及影响范围(如单台互感器、某条母线)。故障置信度取值范围为 0~100%,置信度 $\geq 85\%$ 时判定为可靠诊断。

解读需对照行业标准验证结果合理性:绕组开路判定需满足“二次侧电流 $\leq 0.1\text{A}$ 且铁芯温度 $\geq 70^\circ\text{C}$ ”,绝缘破损判定需满足“绝缘电阻 $\leq 10\text{M}\Omega$ 且局部放电量 $\geq 50\text{pC}$ ”,确保诊断结果与实际故障特征一致。优先级判定结合故障影响程度与设备重要性分级执行:一级优先级对应“故障影响主供电电路且置信度 $\geq 90\%$ ”,如 110kV 主变侧互感器绕组开路,需 1h 内安排检修;二级优先级对应“故障影响分支电路且置信度 $\geq 85\%$ ”,如 35kV 馈线侧互感器绝缘破损,需 4h 内响应;三级优先级对应“故障仅影响单台设备且置信度 80%~85%”,如 10kV 配网侧互感器轻微异常,可 24h 内规划检修。分级结果需同步推送至检修调度系统,保障资源优先调配至紧急故障。

4.4 检修方案的产生和调整

方案生成需依据诊断结果与设备参数自动匹配标准流程,明确检修步骤、工具选型及安全要求。以

绕组开路检修为例,步骤需包含“停电验电→拆除二次接线→检测绕组通断→更换故障导线→复装接线→绝缘测试→送电试验”;工具选型需明确具体规格,如采用 2500V 绝缘电阻测试仪测量绝缘电阻、0.5 级钳形电流表验证电流恢复情况、红外测温仪监测复装后温度;安全要求需明确——停电范围需覆盖互感器两侧 3 米区域、验电接地后再作业、作业环境温度控制在 $-5^\circ\text{C}\sim 40^\circ\text{C}$ 。

方案需包含量化验收指标:绝缘测试需达到“一次对二次及地 $\geq 1000\text{M}\Omega$ 、二次对地 $\geq 500\text{M}\Omega$ ”,电流恢复需满足“二次侧电流与额定值偏差 $\leq 0.5\%$ ”,确保检修效果可验证。方案需结合现场实际情况动态调整优化:若检测发现绕组开路伴随绝缘老化,需新增“绝缘材料更换”步骤,选用耐温等级 155°C 的环氧树脂绝缘件;若作业环境湿度 $> 85\%$,需增加“除湿设备部署”环节,将湿度控制在 70% 以下再开展接线作业。调整后的方案需通过系统二次校验,确保修改内容符合 DL/T596-2021《电力设备预防性试验规程》,且检修时长偏差控制在 $\pm 10\%$ 范围,避免因方案不合理延长停电时间。

5 结语

本文首先梳理电流互感器绕组开路、绝缘破损等典型异常类型,明确模型应用需求,提出数据对接等多维度应用方法,为变电检修提供系统性技术思路。该模型可推动互感器异常诊断从人工向智能转型,后续可结合更多异常类型优化模型,进一步提升其对变电检修工作的适配性与实用价值,助力电网运维提质增效。

参考文献

- [1] 李文璞, 毛颖科, 廖道, 谢可, 刘迪, 张晓航. 基于旋转目标检测的变电设备红外图像电压致热型缺陷智能诊断方法[J]. 高电压技术, 2021, 47 (9): 3246-3253.
- [2] 罗海鑫, 李新海, 王振刚, 邱天怡, 袁拓来. 零序电流互感器及其二次回路不停电智能检测装置研制[J]. 电工技术, 2022 (24): 115-117.
- [3] 李伟山. 大型水泵电机振摆异常智能诊断系统的研究与应用[J]. 水电站机电技术, 2023, 46 (10): 119-122.