

变电设备在线监测系统设计与实现

李 钢 仇 昊

内蒙古电力(集团)有限责任公司阿拉善供电分公司 内蒙古 阿拉善盟 750300

摘 要: 本文聚焦变电设备在线监测系统设计与实现。先分析监测对象与故障模式,设计“分层架构、分布式部署”系统架构。硬件方面,合理选型部署传感器,设计边缘计算网关,做好抗干扰与可靠性设计。软件上构建数据融合处理框架,采用“传统+智能”故障诊断算法,开展数字孪生建模与仿真。通过实验平台搭建、功能测试及工程案例分析,验证系统有效性与实用性,为变电设备智能化运维提供支持。

关键词: 变电设备; 在线监测; 故障预警; 数字孪生

引言: 变电设备是电力系统稳定运行的核心,其故障可能引发大面积停电。传统监测方式存在滞后性,难以满足需求。在线监测系统可实时获取设备状态,实现故障预警与精准诊断。本文围绕变电设备在线监测系统展开研究,分析监测需求,设计系统架构,阐述硬件与软件设计,通过实验测试与工程案例验证系统性能,旨在提升变电设备运维水平,保障电网安全稳定运行。

1 变电设备监测需求分析与系统架构设计

1.1 监测对象与故障模式

变电设备是电力系统安全稳定运行的核心支撑,其运行状态直接决定电网供电可靠性,因此明确监测对象与故障模式是系统设计的前提。监测对象主要涵盖变压器、GIS(气体绝缘开关设备)、断路器、互感器等关键设备,其中变压器作为能量转换核心,GIS作为高压开关核心,是重点监测对象。故障模式具有多样性和隐蔽性,变压器常见故障包括局部放电、油中溶解气体超标、绕组过热、绝缘老化等,多由长期负荷不均、绝缘受潮或制造缺陷引发;GIS主要故障为机械振动异常、SF₆气体泄漏、内部放电等,易导致设备误动或绝缘击穿;断路器则以机构卡涩、接触不良、绝缘损坏为主要故障类型。这些故障若未及时发现,会逐步恶化引发设备停运,甚至造成大面积停电事故。

1.2 系统架构设计

为实现变电设备全方位监测、高效数据处理及精准故障预警,系统采用“分层架构、分布式部署”的设计思路,整体分为感知层、边缘计算层、传输层和应用层四层,各层独立运行且协同联动。感知层作为数据采集终端,部署各类专用传感器,负责捕捉设备运行参数和故障特征信号,是系统的数据来源基础。边缘计算层部署边缘网关设备,承担本地数据预处理、降噪、融合及简单故障判断任务,可快速响应本地预警需求,减少数

据传输压力,提升系统实时性^[1]。传输层采用有线与无线网络相结合的方式,有线网络用于核心区域稳定传输,无线网络适配偏远或不便布线的监测点,确保数据安全、高效传输至应用层。应用层部署在监控中心服务器,包含数据管理、故障诊断、数字孪生仿真、报表统计等功能模块,为运维人员提供可视化操作界面,实现设备状态实时监控、故障精准诊断及运维决策辅助,整体架构兼顾可靠性、扩展性和实用性,适配不同规模变电站的应用需求。

2 变电设备在线监测硬件系统设计与实现

2.1 传感器选型与部署

传感器作为硬件系统的核心感知单元,其选型与部署合理性直接决定监测数据的准确性和可靠性,需结合监测对象、故障模式及现场环境综合考量。针对变压器局部放电监测,选用超高频传感器,具备抗干扰能力强、监测灵敏度高的特点,部署于变压器油箱顶部及套管处,确保全面捕捉局部放电信号;油中溶解气体监测选用气相色谱传感器,可精准检测甲烷、乙烷、乙炔等特征气体含量,部署于变压器油枕处,实现油样实时采集与分析。针对GIS设备,振动监测选用压电式加速度传感器,频率响应范围适配GIS机械振动特性,部署于GIS壳体关键节点;SF₆气体监测选用红外吸收式传感器,具备检测精度高、稳定性好的优势,集成于GIS气室接口处。传感器部署需避开设备高压区域和易磨损部位,固定牢固且便于维护,同时考虑现场温湿度、电磁干扰等环境因素,选用具备相应防护等级的传感器,确保在复杂变电站环境下长期稳定运行,为后续数据处理和故障诊断提供高质量原始数据^[2]。

2.2 边缘计算网关设计

边缘计算网关作为硬件系统的核心枢纽,承担着感知层数据汇聚、本地处理、协议转换及数据传输的关键任务,设计需兼顾实时性、可靠性和扩展性。网关采用

嵌入式架构,选用高性能工业级处理器,具备较强的数据处理能力和多接口扩展能力,可同时接入不同类型、不同协议的传感器,实现局部放电、振动、气体含量等多类型数据的统一汇聚。软件层面集成协议转换模块,支持Modbus、TCP/IP、LoRa等多种通信协议,将传感器输出的模拟信号、数字信号统一转换为标准格式,便于后续数据传输和处理。同时,嵌入本地数据处理算法,对采集到的原始数据进行降噪、滤波、数据融合及异常检测,筛选有效数据并剔除干扰数据,减少无效数据传输带来的网络压力。另外,网关具备本地存储功能,可缓存一定周期的监测数据,避免网络中断时数据丢失;配备冗余通信接口,支持有线与无线双重传输模式切换,确保数据稳定传输至应用层,同时具备远程升级和故障自诊断功能,降低现场运维成本,提升网关运行可靠性。

2.3 抗干扰与可靠性设计

变电站现场存在强电磁干扰、温湿度波动大、粉尘多等复杂环境,严重影响硬件系统的运行稳定性和数据采集准确性,因此抗干扰与可靠性设计是硬件系统实现的关键。抗干扰设计主要从电磁屏蔽、接地处理、信号隔离三个方面入手,传感器和边缘网关外壳采用金属屏蔽结构,有效阻挡外部电磁辐射干扰;所有硬件设备采用统一接地设计,接地电阻控制在规范范围内,避免地电位差引发的干扰;信号传输采用屏蔽电缆,同时在传感器与网关接口处设置信号隔离模块,实现模拟信号与数字信号的隔离,抑制传导干扰。可靠性设计方面,选用工业级元器件,具备宽温、抗振动、抗粉尘的特点,适配变电站现场环境;硬件电路采用冗余设计,关键模块设置备份,避免单一模块故障导致整个系统瘫痪;加入过压、过流、防雷保护电路,防止雷击和电压突变损坏设备。优化硬件结构设计,提升设备散热性能和密封等级,确保硬件系统在长期连续运行中保持稳定,保障监测工作持续有效开展。

3 软件系统设计与关键算法实现

3.1 数据融合与处理框架

软件系统的数据融合与处理框架,是监测数据从原始采集到有效利用的核心,旨在提升数据质量、降低冗余,为故障诊断提供可靠支撑。该框架采用分层模式,含数据预处理、融合、存储三模块。预处理模块针对原始数据,用均值滤波、小波降噪等算法剔除无效数据和异常值,插值补全缺失数据,完成标准化和归一化处理。数据融合模块采用多源融合算法,结合不同传感器和监测维度数据,通过加权、证据理论融合等方式,整合设备状态信息,提升完整性与可靠性。数据存储模块采用

“本地缓存+云端存储”混合模式,本地缓存近期关键数据,云端存储长期数据,用分布式数据库支持海量数据操作,还有备份恢复功能,框架扩展性强。

3.2 故障诊断算法

故障诊断算法是软件系统精准识别、定位和预警故障的核心,采用“传统+智能”算法结合思路提升精度效率。针对变压器局部放电等典型故障,用支持向量机算法精准识别故障类型;针对GIS机械振动异常,用小波包分解提取特征频率,结合BP神经网络定位判断^[1]。引入深度学习算法构建CNN-LSTM混合模型,利用CNN提取深层特征,LSTM捕捉时间序列趋势,适用于早期预警。算法融入故障诊断知识库,结合专家经验降低误判率。且具备自学习能力,能积累历史数据优化参数,提升适应性和精准度,满足不同场景需求。

3.3 数字孪生建模与仿真

数字孪生建模与仿真是提升系统智能化水平的关键,通过构建变电设备数字孪生体,实现物理与虚拟模型实时映射、仿真分析和运维优化。建模采用多维度思路,结合设计图纸等构建几何、物理、行为模型。几何模型用三维技术精准还原设备结构,实现可视化;物理模型模拟运行状态等;行为模型模拟不同运行条件行为特征。仿真功能包括正常、故障和运维仿真,正常运行仿真为优化运行提供参考;故障仿真验证诊断算法;运维仿真辅助运维决策。通过此技术,实现设备全生命周期监测和智能化运维,提升运维效率和决策科学性。

4 系统测试与工程应用分析

4.1 实验平台搭建

为验证变电设备在线监测系统的功能完整性、性能稳定性和数据准确性,搭建贴合现场实际运行环境的实验平台,确保测试结果具有可靠性和实用性。实验平台由模拟变电设备、硬件监测单元、边缘计算网关、传输网络和应用层服务器组成。模拟变电设备选用与现场一致的变压器、GIS设备,通过人工设置故障(如变压器局部放电模拟、GIS振动异常模拟),模拟设备正常运行和各类故障状态。硬件监测单元部署前文设计的各类传感器和边缘网关,按照现场部署规范安装固定,确保数据采集的真实性和合理性。传输网络采用有线(以太网)和无线(LoRa)双重模式,模拟现场复杂的网络环境,测试数据传输的稳定性和实时性。应用层服务器部署软件系统,安装数据处理、故障诊断、数字孪生仿真等模块,配置相应的算法参数和数据库。

4.2 功能测试

功能测试围绕系统设计的核心功能展开,采用“分

模块测试+整体联调”的方式，逐一验证各模块功能的完整性和有效性，确保系统满足设计需求。首先进行感知层测试，检测各类传感器的数据采集精度、响应速度，验证传感器对设备运行参数和故障特征的捕捉能力，确保采集数据准确、实时。其次进行边缘计算层测试，验证边缘网关的数据汇聚、协议转换、本地数据处理功能，测试网关在多传感器接入情况下的运行稳定性，以及本地异常检测和预警的响应速度。然后进行传输层测试，模拟不同网络环境，测试数据传输的稳定性、实时性和可靠性，验证数据备份和恢复功能的有效性。最后进行应用层测试，逐一验证数据处理、故障诊断、数字孪生仿真、报表生成、远程访问等功能，测试故障诊断的精度、预警的及时性，数字孪生模型与物理设备的映射一致性，以及报表生成的准确性和完整性。

4.3 工程案例分析

4.3.1 案例1：变压器局部放电预警

本案例应用于220kV变电站1号主变压器，该变压器已运行8年，长期处于高负荷运行状态，存在局部放电隐患，部署本研究设计的在线监测系统实时监测。系统在变压器油箱顶部、套管处部署超高频传感器，边缘网关实时采集局部放电信号，通过传输网络将数据传输至应用层服务器，软件系统采用小波降噪算法对数据进行预处理，结合SVM故障诊断算法和局部放电特征参数，实现局部放电的实时监测和预警。运行期间，系统于某次负荷高峰时段捕捉到局部放电信号异常，放电幅值超出阈值，系统快速发出声光预警，同时通过数字孪生模型模拟局部放电的位置和严重程度，初步判断为变压器绕组绝缘老化引发的局部放电。运维人员接到预警后，及时对变压器进行停电检修，通过专业检测确认故障位置和原因，采取绝缘加固处理措施，消除故障隐患。本次案例中，系统提前72小时发出预警，避免变压器故障恶化引发的设备停运，验证系统在变压器局部放电监测、预警方面的有效性和实用性，降低现场运维成本，提升设备运行可靠性。

4.3.2 案例2：GIS机械振动异常定位

本案例应用于110kV变电站GIS设备，该GIS设备投运5年，近期运维中发现设备运行时异常异响，部署本系统对其进行机械振动实时监测和异常定位。系统在GIS壳体关键节点（断路器、隔离开关接口处）部署压电式加速度传感器，采集设备运行过程中的振动信号，边缘网关对振动数据进行初步处理后传输至应用层，软件系统采用小波包分解算法提取振动信号的特征频率，结合BP神经网络算法，对振动异常进行定位和诊断^[4]。运行10天后，系统监测到GIS断路器区域振动幅值异常升高，特征频率偏离正常范围，系统快速定位异常位置为断路器操作机构，同时判断异常原因可能为机构卡涩或部件松动。运维人员对该区域进行拆解检查，发现断路器操作机构连杆松动，及时进行紧固处理后，振动信号恢复正常。本次案例中，系统精准定位振动异常位置，诊断误差控制在5cm以内，避免了GIS设备因机械振动异常引发的绝缘击穿、设备误动等故障，验证了系统在GIS机械振动监测、异常定位方面的精准性和可靠性，为GIS设备的智能化运维提供有效支撑。

结束语

变电设备在线监测系统的设计与实现，融合硬件选型部署、软件算法开发及数字孪生等多项技术。通过分层架构与分布式部署，实现全方位监测与精准故障预警。实验测试与工程案例表明，系统能有效提升数据质量、降低误判率，精准定位故障，为运维决策提供科学依据。未来，随着技术发展，系统将不断完善，为电力系统的智能化运维发挥更大作用。

参考文献

- [1]林婷婷,陈鹏强.基于在线监测技术的变电站运行检修系统设计与实现[J].电气技术与经济,2024(12):374-376,383.
- [2]李梦平,关洁.输变电设备在线监测系统中故障诊断算法研究与比较[J].电力设备管理,2024(9):177-179.
- [3]牟凯,徐建军,杨鹏.智能变电站二次系统回路安全在线监测技术[J].陕西煤炭,2023,42(04):110-114.
- [4]高玮,李轩,李灿.变电设备在线监测技术在智能变电站的应用研究[J].光源与照明,2023(06):159-161.