

基于数字孪生的变电站值班辅助决策系统研究

李锦涛 吉雅嘎

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 750306

摘要: 本文聚焦基于数字孪生的变电站值班辅助决策系统,阐述了数字孪生技术基础,其通过建模等实现“虚实同步”等功能,在电力领域应用广泛。分析变电站运维需求,指出传统模式在实时监控、故障处置等方面存在不足。随后从功能、性能、用户三方面剖析系统需求,设计“物理层-应用层”五级架构及核心模块,依托多项关键技术。实现了日常运维、故障诊断、应急处置等功能,为变电站值班决策提供全流程支持,提升运维效率与质量。

关键词: 数字孪生; 变电站; 辅助决策; 智能运维

1 数字孪生与变电站运维基础理论

1.1 数字孪生技术概述

数字孪生技术是通过三维建模、实时数据采集、动态映射构建物理实体的虚拟镜像,实现“虚实同步、模拟分析、优化控制”的技术体系,其核心架构包含物理实体、虚拟模型、数据链路与服务应用四层。在技术特性上,数字孪生具备实时性(毫秒级数据同步)、高保真度(毫米级建模精度)、交互性(虚实双向控制)与推演性(多场景模拟)四大优势。从技术发展来看,数字孪生已从早期的几何建模(静态映射)演进至“几何+物理+行为”多维度建模(动态映射),结合AI算法可实现设备状态预测与决策优化。在电力领域,数字孪生技术已应用于发电、输电、配电全环节,如水电厂机组状态监测、输电线路覆冰预警等,其核心价值在于打破物理设备与数字管理的壁垒,将“事后运维”转向“事前预判”,为变电站值班决策提供全要素、动态化的技术支撑。

1.2 变电站运维需求分析

变电站运维的核心需求围绕“安全、高效、经济”展开,具体可分为实时监控、故障处置、计划运维三类。在实时监控需求方面,值班人员需实时掌握设备运行状态(如变压器温度、断路器分合状态、SF6气体压力),传统依赖SCADA系统的静态数据展示,存在数据滞后(10-15分钟)、设备内部状态不可见(如绕组温度)等问题,难以满足“秒级响应”的监控需求。在故障处置需求方面,当设备出现故障(如母线短路、绝缘子闪络)时,需在30分钟内完成故障定位、原因分析与预案匹配,传统人工排查需1-2小时,且易因经验不足导致误判,增加停电风险。在计划运维需求方面,需结合设备健康状态、负荷波动、环境因素(如雷雨季节)制定巡检与检修计划,传统按固定周期运维(如每月1

次全检)存在资源浪费或漏检问题,难以实现“按需运维”。随着新能源(光伏、储能)接入变电站,运维需求新增“源网荷储协同决策”,需整合多类型设备数据,传统决策模式已无法适配^[1]。

1.3 数字孪生赋能变电站的可行性

数字孪生技术在变电站运维中的可行性,体现在技术适配性、场景覆盖性与效益提升性三方面。从技术适配性来看,变电站设备布局固定、参数采集点明确,可通过部署红外热像仪、电流互感器、声纹传感器等设备,实现物理数据的全面采集,为虚拟建模提供数据支撑;同时,5G、边缘计算技术的成熟,可满足数字孪生“毫秒级数据传输与处理”的需求,如5G网络时延 $\leq 10\text{ms}$,边缘节点可本地处理高频数据(如1000Hz的电流数据),避免数据传输拥堵。从场景覆盖性来看,数字孪生可覆盖变电站全运维场景:日常监控中,通过虚实映射实现设备状态可视化;故障处置中,通过模拟推演预演方案效果;计划运维中,通过设备行为建模预测健康趋势,解决传统运维场景的痛点。

2 基于数字孪生的变电站值班辅助决策系统需求分析

2.1 功能需求

系统功能需求围绕变电站值班决策的核心场景,分为日常运维、故障诊断、应急处置三大模块。在日常运维功能需求方面,需实现设备状态实时监测(如温度、电压、电流参数同步至虚拟模型)、健康趋势预测(如基于LSTM算法预测变压器绝缘老化趋势)、巡检计划优化(结合设备健康度与环境因素生成差异化巡检路线),解决传统运维“盲目巡检、状态难预判”的问题。在故障诊断功能需求方面,需具备故障自动定位(如通过故障树分析定位母线短路点,误差 $\leq 1\text{米}$)、多故障耦合分析(如同时处理“开关拒动+线路过载”场景)、原因追溯(关联历史故障数据与实时参数,分析

故障诱因),满足“快速、精准”的故障诊断需求。在应急处置功能需求方面,需支持应急预案自动匹配(如通过余弦相似度算法匹配故障场景与预案库)、方案模拟推演(在虚拟模型中预演负荷转移效果)、操作指令下达(远程控制断路器分合),确保故障处置“安全、高效”。此外,功能需求还包括数据查询(历史运行曲线、决策日志)与报表生成(月度运维报告),为值班人员提供全流程决策支持。

2.2 性能需求

系统性能需求聚焦“实时性、准确性、稳定性、兼容性”四大指标,确保满足变电站24小时不间断运维的需求。在实时性需求方面,物理设备数据采集频率需达100Hz(如电流、电压),虚实模型同步时延 $\leq 50\text{ms}$,故障预警响应时间 $\leq 10\text{秒}$,避免因数据滞后导致决策延误,如变压器油温超标时,系统需在10秒内触发预警并推送原因分析。在准确性需求方面,设备状态监测误差需 $\leq 2\%$ (如红外测温误差 $\pm 0.5^\circ\text{C}$),故障定位准确率 $\geq 95\%$,预案匹配相似度 $\geq 90\%$,确保决策依据的可靠性,如通过数字孪生定位的故障点与实际位置偏差不超过1米。在稳定性需求方面,系统年均无故障运行时间(MTBF) $\geq 8760\text{小时}$ (即全年无故障),支持7×24小时连续运行,在极端天气(如暴雨、高温)或设备故障(如传感器离线)时,具备降级运行能力(如自动切换备用数据源),避免系统瘫痪。在兼容性需求方面,需支持与变电站现有系统(SCADA、EMS、巡检机器人平台)对接,兼容OPCUA、MQTT等主流通信协议,可接入不同品牌的传感器与执行设备(如ABB断路器、南网巡检机器人),避免重复建设与数据孤岛^[2]。

2.3 用户需求

系统用户主要包括变电站值班人员(监控岗、决策岗、运维岗)与电网调度中心人员,不同用户的需求存在差异化。监控岗用户(日常负责设备状态监控)需求聚焦“可视化、便捷性”,希望通过三维虚拟模型直观查看设备状态(如颜色标注超标参数),支持一键筛选重点设备(如主变、母线),并提供异常参数自动弹窗提示,减少人工盯屏压力。决策岗用户(负责故障分析与方案制定)需求侧重“精准性、辅助性”,需要系统提供故障原因分析报告(如“绝缘子闪络因积污+湿度超标”)、多方案对比(如不同负荷转移路径的停电范围对比),并支持人工调整方案后重新推演效果,提升决策科学性。运维岗用户(负责现场操作与设备维护)需求关注“实用性、安全性”,希望系统提供详细的操作步骤(如更换变压器套管的流程)、工具与人员配置建

议,并具备操作权限管控(如人脸识别验证),防止误操作。调度中心用户需求在于“协同性、可追溯性”,需实时获取变电站故障处置进度与数据,支持远程查看虚拟模型中的处置过程,并留存决策日志(如操作时间、操作人员),便于后续追溯与考核。

3 基于数字孪生的变电站值班辅助决策系统架构设计

3.1 总体架构

系统采用“物理层-数据层-模型层-决策层-应用层”五级总体架构,实现“数据采集-整合-建模-决策-应用”的全流程闭环。物理层作为数据源头,部署三类设备:监测设备(红外热像仪、电流互感器、SF₆气体传感器等,采集设备状态与环境参数)、执行设备(断路器、隔离开关、冷却风扇等,接收系统控制指令)、传输设备(5G基站、光纤交换机,保障数据传输),如在220kV变电站中,每台主变部署3台红外热像仪,分别监测绕组、铁芯与套管温度。数据层负责数据整合与存储,通过边缘计算节点对采集数据进行预处理(滤波去噪、异常值剔除),再传输至混合存储架构:时序数据库(InfluxDB)存储实时高频数据(如100Hz的电流数据)、关系数据库(MySQL)存储历史故障与预案数据、区块链(Fabric)存储关键操作记录(如开关控制指令),确保数据安全与可追溯。模型层是数字孪生核心,构建“几何-物理-行为”三位一体模型:几何模型基于BIM+GIS技术,以毫米级精度还原变电站布局与设备细节;物理模型建立设备参数关联(如变压器损耗与负荷的关系模型);行为模型通过LSTM算法模拟设备在不同工况下的状态变化(如负荷增加时的温度波动)。决策层依托AI算法生成决策方案,包括故障诊断模型(FTA+贝叶斯网络)、运维优化模型(遗传算法)、应急决策模型(余弦相似度匹配)。应用层通过可视化界面呈现功能,供值班人员操作与交互,如三维监控界面、故障诊断报告模块、应急处置推演模块。

3.2 核心模块设计

系统的核心模块包括数据采集与预处理模块、数字孪生模型构建模块、故障诊断模块和决策支持模块。数据采集与预处理模块负责对感知层采集的原始数据进行清洗、转换和归一化处理,提高数据的质量和可用性^[3]。数字孪生模型构建模块根据设备的物理特性和运行数据,构建高精度的数字孪生模型,实现虚拟模型与物理设备的实时映射。故障诊断模块运用智能算法对数字孪生模型和实时数据进行分析,识别设备的故障特征,判断故障类型和位置。决策支持模块根据故障诊断结果和设备的运行状态,结合运维规则和专家经验,为值班人员提供合

理的运维决策建议。

3.3 关键技术支撑

系统的实现依赖于多项关键技术的支撑,传感器技术是数据采集的基础,高精度的传感器能够准确获取设备的运行数据。物联网技术实现了传感器与系统之间的数据传输和通信,确保数据的实时性和可靠性。大数据分析技术对海量的设备数据进行存储、管理和分析,挖掘数据中的潜在信息。人工智能技术,如机器学习、深度学习等,用于构建故障诊断模型和决策支持模型,提高系统的智能化水平。虚拟现实和增强现实技术可实现设备的三维可视化展示和交互操作,为值班人员提供更加直观的运维体验。

4 基于数字孪生的变电站值班辅助决策系统功能实现

4.1 日常运维决策功能实现

在日常运维决策方面,系统通过数字孪生模型实时监测设备的运行状态,包括设备的温度、压力、电流、电压等参数。当设备参数超出正常范围时,系统会及时发出预警信息,提醒值班人员关注设备的运行情况。同时,系统会根据设备的历史运行数据和运维记录,运用大数据分析技术预测设备的剩余寿命和可能出现的故障,为值班人员制定合理的运维计划提供依据。例如,对于运行时间较长的变压器,系统可以预测其绝缘性能的变化趋势,建议值班人员在合适的时间进行绝缘检测和维修,避免因绝缘故障导致设备损坏。

4.2 故障诊断决策功能实现

故障诊断决策功能是系统的核心功能之一。当系统检测到设备出现异常时,会立即启动故障诊断流程。首先,系统会收集设备的实时运行数据和历史数据,并将其输入到预先构建的故障诊断模型中。该模型运用机器学习算法,如支持向量机、神经网络等,对数据进行分析和处理,识别设备的故障特征。然后,系统会根据故障特征与已知故障模式的匹配程度,判断故障的类型和

位置。最后,系统会为值班人员提供详细的故障诊断报告,包括故障原因、影响范围和维修建议,帮助值班人员快速准确地处理设备故障^[4]。

4.3 应急处置决策功能实现

在应急处置决策方面,系统制定了完善的应急预案。当发生重大故障或事故时,系统会迅速启动应急响应机制,根据故障的类型和严重程度,自动选择相应的应急预案。同时,系统会实时监测事故的发展态势,为值班人员提供动态的决策支持。例如,在发生火灾事故时,系统会及时显示火灾的位置和蔓延情况,指导值班人员采取正确的灭火措施和疏散方案。系统还会与外部应急救援机构进行信息共享和协同指挥,提高应急处置的效率和效果,最大限度地减少事故损失。

结束语

基于数字孪生的变电站值班辅助决策系统,融合多项先进技术,实现了从数据采集到决策应用的全流程闭环。它有效解决了传统变电站运维在实时监控、故障处置、计划运维等方面的难题,提升了运维决策的科学性与精准性。随着技术的不断发展,该系统有望进一步完善与优化,为变电站的安全稳定运行提供更强大的技术支撑,推动电力行业向智能化、高效化方向持续迈进。

参考文献

- [1]王骏东,徐国栋,周游,等.基于数字孪生及北斗/UWB定位的变电站安全管控研究[J].电力安全技术,2025,27(02):53-57.
- [2]丁炀,赵敏,衡茜,等.基于数字孪生的变电站智能巡视系统研究[J].电力与能源,2024,45(06):675-678.
- [3]宋禹锐,王媛媛.基于数字孪生技术的变电站智慧管理系统设计[J].电气技术与经济,2024,(08):245-247.
- [4]王璐,苗淞.基于数字孪生技术的变电站智能管理与运维优化研究[J].电工电气,2024,(05):69-73.