

基于数字孪生的特高压变电站一次设备全景监控系统设计

孙明明 王 琳

特变电工(天津)智慧能源管理有限公司 天津 300000

摘 要: 特高压变电站一次设备运行环境复杂, 传统监控手段在数据覆盖度与状态呈现维度上均存在明显不足。本文围绕数字孪生技术, 提出一种覆盖全站一次设备的全景监控系统设计方案。系统采用分层架构搭建整体运行框架, 融合三维几何模型与多物理场机理模型完成设备数字孪生体构建, 并通过标准化数据映射机制实现虚实状态同步。功能层面设计了实时感知、全景展示、智能研判与数据回溯四大模块, 打通从数据采集到状态分析的完整链路, 为特高压变电站设备监控提供了系统化的技术支持。

关键词: 特高压变电站; 数字孪生; 全景监控; 一次设备; 状态监测

引言: 特高压变电站承担着区域电网电能输配的关键职能, 一次设备长期运行于高电压、大电流的复杂工况下, 对监控系统的覆盖范围与感知精度有着严苛标准。传统分层分布式监控体系在数据融合、状态可视化、异常研判等方面存在明显局限, 难以满足全站设备一体化管控需求。数字孪生技术以虚实映射与动态迭代的技术特性, 为突破传统监控瓶颈提供了可行路径。围绕特高压一次设备全景监控系统的设计逻辑与关键技术展开论述, 对提升变电站智能运维水平具有实际参考价值。

1 特高压变电站一次设备与监控体系架构

1.1 特高压变电站一次设备组成与运行特征

特高压变电站一次设备构成电力输送网络的核心载体, 整套设备集群承担电压变换与电能传输的关键职能。主变压器实现电网电压等级的升降调整, 保障大容量电能可在区域电网之间稳定流转。高压开关装置控制电力回路的通断切换, 适配电网调度过程中的各类工况变动。互感器持续捕捉电网运行过程中的电压、电流等实时参数, 为设备状态监测提供原始数据支撑^[1]。母线与高压电抗器等辅助装置维系电网参数平稳, 削弱电力运行过程中的波动问题。设备长期处于高电压、大电流的工作环境, 环境温度变化与空间电磁场扰动都会改变运行状态, 整体运行过程对稳定性与可靠性具备严苛标准。

1.2 一次设备传统监控体系组成结构

传统监控系统依靠分层分布式硬件结构搭建整体运行框架, 通过前端部署的各类传感元件捕捉设备运行实时信息。专用电力通信线路承载现场采集的数据资源, 将各类运行参数稳定传输至后台存储单元完成归档处理。后台监控终端汇总各类监测信息, 完成设备基础运行状态的展示与留存。系统功能分区具备固定划分模式, 监测单元按照设备种类单独布置, 不同一次设备对

应独立的数据采集与监测通道。整套监控功能依托定型硬件设备实现, 数据处理与状态反馈流程遵循预设程序完成固定运转。

1.3 现有监控体系存在的运行短板

传统监控体系的采集方式存在明显局限性, 只能针对固定参数开展数据获取工作, 无法覆盖设备全方位运行状态。数据处理方式偏向静态化统计分析, 很难捕捉设备工况瞬时变动的细节特征。各类监测单元保持独立运行状态, 不同设备采集的数据资源难以互通融合, 无法形成覆盖全站设备的完整状态分析体系。监控界面仅能完成基础数据的简单展示, 无法构建立体直观的设备运行态势场景, 监测维度相对单薄。硬件监测点位与运行逻辑固化, 难以跟随设备动态工况做出适配调整, 监测覆盖范围与响应精度存在明显缺陷。

1.4 数字孪生技术适配监控系统的应用特性

数字孪生技术依托虚拟建模手段建立物理设备与虚拟场景的精准对应关系, 完整复刻特高压一次设备的实体结构与运行状态。技术框架兼容多类型异构数据的整合分析工作, 可接纳电力系统各类运行参数, 完成统一整理与深度解析。虚拟模型能够跟随物理设备工况变化实时更新状态, 始终贴合变电站现场真实运行场景。技术应用模式打破传统监测静态化的运行局限, 构建三维可视化监控场景, 有效拓展设备状态监测的覆盖维度。数据融合与动态迭代的技术优势, 能够补足传统监控模式的各类短板, 有效提升特高压变电站设备监控的精细程度与智能化水平。

2 全景监控系统总体设计思路与架构搭建

2.1 系统设计原则与设计目标

全景监控系统的设计工作围绕电力设备运行监控的实际需求展开, 遵循电力系统运行的通用规范开展整体

规划。设计工作注重整体架构的通用性与拓展性,适配特高压变电站各类一次设备的监控需求。系统搭建秉持稳定可靠的设计理念,保障长期连续运行过程中的工作稳定性,降低异常故障出现概率^[2]。整体设计兼顾实用性与智能性,依托数字孪生技术优化传统监控模式,丰富设备状态感知方式。设计工作聚焦监控精度与运行效率的提升,打通多维度数据处理通道,实现变电站设备运行状态的全域覆盖监测。

2.2 系统整体层级架构规划

全景监控系统采用分层化的架构设计方式,按照功能属性划分多层级运行框架。底层架构依托现场传感与采集设备搭建数据感知层级,负责捕捉全站一次设备的各类运行数据。中间层级承担数据处理与模型运算工作,完成原始数据的清洗整合与孪生模型的动态运算。上层架构搭建可视化监控与交互层级,实现设备运行状态的立体化展示与状态研判。各层级保持独立运行属性的同时建立数据互通链路,形成自上而下完整的监控运行体系,适配特高压变电站复杂的运行场景。

2.3 系统功能模块整体划分

依据全景监控的工作需求,系统内部划分多个独立且联动的功能模块。数据采集模块负责汇总现场各类传感设备传输的运行数据,覆盖电气参数与设备状态参数。模型构建模块专注完成一次设备三维虚拟模型的搭建与动态更新,实现物理设备的数字化映射。状态监控模块整合各类数据与模型信息,实现设备运行态势的全域监测展示。数据管理模块统筹完成数据存储、整理与调取工作,为系统各项功能运转提供数据支撑,贴合变电站常态化监控工作需求。

2.4 系统运行逻辑与数据流转框架

系统整体运行遵循数据驱动的工作逻辑,以现场实时数据流转支撑全流程监控工作。现场采集设备持续捕捉设备运行原始数据,通过专属传输链路推送至系统后台。后台完成数据筛选与规整处理后,同步更新虚拟孪生模型的运行参数,保持虚拟场景与物理现场的同步适配。系统依托更新后的模型数据完成设备状态分析,将有效信息推送至可视化终端完成展示。完整数据流转链路贯穿采集处理建模展示全流程,保障全景监控工作的连续性与实时性。

3 数字孪生模型构建关键技术设计

3.1 特高压一次设备实体数据采集体系设计

特高压一次设备的数字化建模需要依托多维度实体数据作为基础支撑,针对性搭建适配电力场景的专属采集体系。布置高精度传感终端覆盖变压器开关设备互感

器等核心装置,全面捕捉设备运行产生的电气量状态量与环境量信息。电气量采集工作涵盖电压电流功率等动态参数,状态量采集聚焦设备机械位置绝缘状态运行损耗等静态特征。环境量采集囊括现场温湿度电磁强度等外部干扰信息,补足设备运行的外部环境数据维度^[3]。搭建标准化数据采集协议规范各类数据的采集频率与精度标准,统一原始数据的输出格式。布置专用传输通道保障采集数据稳定上传,规避数据丢失或异常扰动带来的信息偏差,为模型构建提供完整可靠的数据源头。

3.2 一次设备三维几何模型搭建方法

三维几何模型搭建依托实体设备结构参数完成数字化复刻,严格匹配特高压一次设备的外形尺寸与空间布局。整合设备出厂结构参数与现场安装实测数据,梳理设备壳体内部构件连接结构等多层级结构信息。采用精细化建模方式还原设备立体形态,精准复刻各类构件的空间位置与装配关系,还原变电站现场设备排布格局。优化模型网格构建工艺,平衡模型精细度与运行负荷,规避冗余结构造成的系统资源占用问题。统一各类一次设备的建模标准,保证不同装置模型的格式统一性,适配全站设备一体化孪生场景的搭建需求。

3.3 设备运行机理模型融合构建方式

几何模型仅能还原设备外在形态,需要融合运行机理模型实现设备工作状态的数字化还原。结合特高压一次设备的电力传输与能量转换规律,梳理设备内部电气运行与物理变化逻辑。将电气机理热力机理与机械运行机理融入三维几何模型,赋予虚拟模型真实的电力设备运行特性。搭建多维度机理融合框架,打通不同运行机理的数据交互通道,实现多物理场状态的协同运算。依托现场实测数据持续修正机理运算参数,弱化理论运算与实际工况的偏差,让虚拟模型的运行规律贴合实体设备工作状态。

3.4 实体设备与孪生模型数据映射机制

数据映射机制搭建设备实体工况与虚拟模型状态的双向对应通道,实现虚实场景的状态统一。梳理实体设备各类运行参数与模型变量的对应关系,建立标准化的数据映射匹配规则。实时采集的现场数据通过映射通道导入孪生模型,动态更新模型内部各项运行变量,完成虚拟状态的实时迭代。搭建精细化映射粒度控制方式,针对不同参数设定专属映射更新频率,适配设备差异化的运行变化规律。规范数据映射的交互逻辑,杜绝参数错乱匹配问题,保障虚拟模型始终同步实体设备的真实运行状态,支撑全景监控功能稳定落地。

4 全景监控系统功能模块详细设计

4.1 一次设备状态数据实时感知模块设计

一次设备状态数据实时感知模块部署于系统底层架构,负责变电站全域一次设备运行信息的采集与预处理工作。现场布设的智能传感终端覆盖站内主变压器、高压开关、互感器及母线等核心装置,持续采集设备运行产生的多元状态信息。采集维度包含电气运行参数、机械工作状态与现场环境变量,全方位捕捉设备运行过程中的动态变化^[4]。模块搭载内置处理逻辑,对现场传回的原始数据流完成筛选净化,剔除传输链路滋生的噪声数据与异常干扰数据。结合特高压电网负荷动态波动特征,灵活调整数据采集频次,适配设备稳态运行与工况波动的差异化监测需求。预处理完成的标准化数据持续向上层系统输送,为孪生模型迭代、设备状态分析提供稳定的数据支撑。

4.2 设备运行状态全景展示模块设计

设备运行状态全景展示模块依托数字孪生三维可视化技术搭建立体监控场景。模块对接系统后台的数据处理单元与模型运算单元,实时接收更新后的设备参数与场景数据,驱动虚拟设备形态、工况参数动态迭代。打破传统监控平面化数据展示的局限,搭建全站沉浸式虚拟场景,真实还原现场设备排布结构与运行状态。界面采用分层布局设计,分别承载全站宏观态势展示与单设备精细状态展示的功能需求。针对特高压变电站设备密集、覆盖范围大的场地特征,优化场景渲染调度机制,平衡画面精细度与系统运行负载,保障三维场景持续流畅运行,实现设备运行状态的可视化管控。

4.3 设备异常状态智能研判模块设计

设备异常状态智能研判模块依托电力设备运行机理与行业标准运行阈值,搭建自动化工况识别逻辑。模块实时比对设备运行数据与常规运行区间,精准捕捉参数偏移、工况异动等异常现象。采用多维度参数关联分析方式,结合电气运行数据、设备状态数据与现场环境数据开展综合研判,降低单一参数波动引发的识别偏差。结合特高压一次设备专属运行属性,细化各类异常工况的判定标准,依据参数偏移幅度划分隐患等级。模块联动三维虚拟场景定位异常设备点位,标注异常对应的参

数类型与故障区域,辅助运维人员排查设备运行隐患,提升设备状态管控的精准程度。

4.4 设备运行数据管理与回溯模块设计

设备运行数据管理与回溯模块完成全站一次设备监测数据的归档分类、存储调度与工况回溯工作。模块接收前端感知模块传输的标准化数据,按照设备种类、数据属性、时间维度完成有序归档,构建层级清晰的设备运行数据库。采用分级存储调度模式,区分实时动态数据与长期历史数据的存储策略,优化系统存储空间利用率,提升数据读写效率。系统搭建多维度检索通道,支持通过设备编号、运行时段、参数类别快速调取对应数据资源。归档留存的历史数据可复原任意时段设备运行工况,还原参数动态变化过程,支撑设备运行规律梳理与工况复盘工作开展。

结束语

全景监控系统的落地运行能够有效弥补传统监控在数据融合与状态感知方面的不足。通过分层架构搭建、数字孪生模型构建与多模块协同配合,可实现一次设备运行状态的全域覆盖与精准研判。虚实数据映射机制保障了虚拟场景与物理现场的持续同步,智能研判模块提升了异常工况的识别效率,数据回溯功能为运行规律梳理与工况复盘提供了可靠支撑。各环节设计相互衔接,共同构成特高压变电站一次设备全景监控的完整技术体系,支撑设备管控水平的持续提升。

参考文献

- [1]张秋皓,于波,侯继发,等.基于数字孪生的特高压变电站一次设备全景监控系统设计[J].电气开关,2026,64(2):44-47,51.
- [2]王向上,李春林,张建广,等.特高压数字孪生变电站中的数模一体关键技术分析[J].电子技术,2024,53(4):139-141.
- [3]吕金壮,廖毅,石延辉,等.数字孪生技术在特高压直流系统中的应用实践[J].南方电网技术,2025,19(5):16-27.
- [4]王伟.变电站一次设备在线监测数据诊断及运维检修[J].百科论坛电子杂志,2022(20):31-33.