

数字孪生驱动的智能变电站自动化系统设计

王伟庆, 娄云, 李军

国网河南省电力公司原阳县供电公司, 河南 原阳 453500

DOI:10.61369/EPTSM.2025060008

摘 要 : 数字孪生技术为智能变电站自动化系统带来了新的设计范式, 突破了传统监控与控制系统的局限。以物理实体与虚拟模型的高精度映射为核心, 该系统实现了对变电设备的全生命周期动态感知、预测控制与智能协同。通过引入实时数据交互机制与多源异构信息融合, 系统具备更高的可靠性、可视化水平与自适应能力, 为变电站的智能化运行提供了强有力支撑。该设计在提升系统响应速度、故障预警准确率与远程调度效率等方面展现出显著优势。

关 键 词 : 数字孪生; 智能变电站; 自动化系统; 虚实融合; 智能控制

Design of Intelligent Substation Automation System Driven by Digital Twin Technology

Wang Weiqing, Lou Yun, Li Jun

Yuanyang Power Supply Company, State Grid Henan Electric Power Company, Yuanyang, Henan 453500

Abstract : Digital twin technology introduces a new design paradigm for intelligent substation automation systems, overcoming the limitations of traditional monitoring and control systems. By leveraging high-precision mapping between physical entities and virtual models, this system achieves dynamic perception, predictive control, and intelligent collaboration throughout the entire lifecycle of substation equipment. Through real-time data interaction mechanisms and multi-source heterogeneous information fusion, the system demonstrates enhanced reliability, visualization capabilities, and adaptive performance, providing robust support for smart substation operations. The design demonstrates significant advantages in improving system response speed, fault prediction accuracy, and remote dispatch efficiency.

Keywords : digital twin; intelligent substation; automation system; virtual-real integration; intelligent control

引言

智能变电站作为智能电网的重要组成部分, 正逐步朝着自动化、数字化、智能化方向演进。在此过程中, 传统的自动化系统面临诸多挑战, 如感知粒度低、系统响应滞后、状态预测能力有限等。数字孪生技术的兴起, 为解决上述问题提供了切实可行的新路径。通过构建与现实设备同步映射的数字镜像, 结合高频采集数据的动态融合, 能够实现设备状态的全景监控与智能控制。在电网运行日益复杂、对安全性与效率要求不断提高的背景下, 构建以数字孪生为核心驱动的智能变电站自动化系统, 正成为推动电力系统革新的关键方向。

一、智能变电站当前自动化系统存在的关键性技术瓶颈

(一) 传统感知与控制系统功能孤岛效应突出

当前多数智能变电站自动化系统采用各子系统独立运行的模式, 信息共享机制薄弱, 系统之间缺乏标准化的数据接口。由于设备厂商不同, 通信协议与数据格式不一致, 导致控制、监测、保护等功能模块难以形成协同联动。这种“功能孤岛”现象限制

了系统整体感知能力与应变效率, 不利于实现全局优化调度。在设备联动、应急控制和状态判断等关键环节上, 信息壁垒造成响应滞后与操作冲突, 影响系统稳定性^[1]。

(二) 设备状态评估与预测分析能力不足

传统变电站多采用定时巡检与简易在线监测方式, 难以全面掌握设备实时状态。由于缺乏高频动态数据支撑, 系统对设备运行趋势与健康状况难以做出准确评估与预测判断, 容易出现“带病运行”或过度维修的现象。故障模式识别手段较为粗放, 难以

及时预警潜在风险。面对复杂电网环境与多变负载条件，现有分析能力难以支撑对关键设备状态的精准研判，严重制约了系统运行的智能化水平^[2]。

（三）系统集成复杂度高导致运行稳定性欠佳

智能变电站涉及多种软硬件系统融合，集成过程中需解决协议转换、接口对接与时序协调等技术难题。一旦系统发生升级或部件更换，整体结构往往需重新适配，增加调试工作量。系统集成不当易引发控制信号冲突、数据冗余甚至通信中断，影响控制逻辑的有效执行。尤其在复杂负载变化或突发事件下，系统易因联动失效而产生运行不稳的问题，难以保障自动化功能的持续性与可靠性。

二、数字孪生技术在智能变电站系统中的功能优势解析

（一）虚实同步机制增强系统的状态可视化能力

数字孪生以实时数据驱动的虚拟模型为基础，通过物理设备与数字模型间的持续同步，实现对设备运行状态、系统拓扑结构及环境参数的高精度动态呈现。该机制使得变电站运维人员能够在数字平台上直观观察到各类设备的实时工况、历史运行轨迹及状态变化趋势，突破了传统二维数据展示的局限。3D建模技术的引入^[3]，使得操作界面更具交互性与沉浸感，便于复杂系统的全局理解与局部精细化分析。借助虚实同步，系统能够快速捕捉微小异常信号并反馈至运维层，从而有效提升故障预判的时间窗口。状态可视化功能也为设备运行参数的趋势分析、能效评估与运行优化提供了重要支撑，有助于实现对整个变电站状态的全面感知。^[4]

（二）多源数据融合提升运行状态的预测精度

在智能变电站运行过程中，涉及结构参数、环境因素、历史运行数据、负荷波动等多个数据维度。数字孪生系统依托边缘计算与云端智能分析技术，能够整合来自不同源头的的数据，包括现场传感器、SCADA系统、历史数据库与外部气象信息。通过深度学习与建模仿真算法，对各类数据进行归一化处理与特征提取，构建精细化的运行模型，实现对设备性能劣化趋势的预测。数据融合不仅提升了系统对异常状态的识别准确率，也增强了对于潜在故障点的定位能力。在电网运行环境高度动态化的背景下，融合技术可提升系统对复杂变化的感知能力，为智能控制策略提供决策依据，确保变电站运行更加高效与稳定^[5]。

（三）实时反馈闭环优化系统自适应调控机制

基于数字孪生架构构建的闭环控制系统，通过感知—分析—决策—执行四个核心环节，实现了从信息获取到控制指令下发的全流程闭环联动。在设备状态出现偏离时，系统能够第一时间完成诊断并自主生成控制策略，快速调整相关设备参数，完成运行状态的自修复。该机制融合人工智能算法，可持续学习与优化控制模型，使系统具备自适应能力，适应电网运行中的频繁波动与多变工况。系统的响应速度显著提升，减少人为干预与中间延迟，提高运行效率与安全等级。实时反馈机制还支持多策略并行

仿真，预评估调整方案的影响，确保执行结果稳定可靠，是实现智能变电站高可靠性运行的重要保障手段。

三、面向数字孪生的智能变电站自动化系统架构设计方案

（一）构建虚拟孪生模型的关键参数与实现路径

虚拟孪生模型的构建需基于精确的设备几何结构、物理属性、运行逻辑与数据接口规范。关键参数包括变电站中各类设备（如断路器、互感器、隔离开关等）的工作状态、响应时间、功率流向与历史运行曲线。模型应具备实时性与可扩展性，并与现场设备通过高速通信链路保持同步更新。实现路径通常分为模型初始化、参数标定、数据驱动优化三个阶段。初始化阶段通过BIM、CAD与GIS技术构建三维模型；参数标定阶段结合设备手册与历史工况数据校正模型行为；数据驱动阶段引入实时数据流进行动态调整与智能仿真。虚拟孪生模型不仅是可视化的基础，更是实现预测控制与优化运行的核心载体^[6]。

（二）通信网络与信息集成平台的高效协同设计

为了实现数字孪生系统的高效运行，通信架构需具备低延迟、高带宽与高安全性特性。以IEC61850标准为基础，设计面向全站的智能电子设备（IED）通信架构，构建涵盖站控层、间隔层与过程层的分层通信体系。信息集成平台则采用分布式架构，通过边缘计算节点进行初步数据处理与筛选，缓解主服务器压力。数据交换使用OPCUA、MQTT等工业协议，保障各系统模块间的互联互通。平台应具备数据融合、存储、调用与可视化能力，并支持AI模型部署接口，提升智能控制决策效率。通信网络与平台设计协同运行，确保数据从采集到应用的闭环流动，构建起信息驱动的智能调度体系。^[7]

（三）智能控制单元的动态决策与执行机制

在数字孪生系统中，控制逻辑由静态规则逐步向基于模型的动态策略演化。智能控制单元通过持续接收虚拟模型与实际运行数据输入，实时评估电气设备运行状况与电网负载状态，结合深度神经网络或模糊控制算法实现最优控制路径选择。控制决策下达过程需考虑负荷分布、能量流动路径、故障定位与负载重构等多重因素。控制单元内嵌故障自愈机制与学习机制，可在系统变化后快速调整控制策略。执行机制则以高可靠性的执行器为基础，完成命令的精确实施，保证控制闭环完整。通过将控制决策与孪生模型动态匹配，实现了控制目标的最优性与执行动作的及时性。^[8]

四、数字孪生系统在智能变电站典型业务场景中的应用分析

（一）设备故障诊断与提前预警系统优化设计

设备故障诊断系统通过集成多类型传感器与实时监测数据，结合孪生模型的仿真结果，构建高维度特征库，应用聚类算法与贝叶斯网络识别异常演化路径。不同于传统的报警阈值触发机

制，该系统能识别出早期隐性故障征兆，实现从“事后处理”向“事前干预”转变。在故障形成初期，系统基于历史相似事件数据库进行模式匹配，预测潜在风险位置与发展趋势，并自动启动相应保护与隔离策略。通过可视化界面展示故障演变过程^[9]，辅助决策层判断应急方案优先级。优化后的预警系统响应时间更短、误报率更低，有效提升了变电站对复杂故障的处理效率。

（二）远程运维调度与状态自恢复机制实例解析

远程运维调度体系基于数字孪生模型构建精细化的设备运行图谱，使得运维控制指令可以依托虚拟环境进行预演与优化。系统通过动态数据监控与任务调度算法分配作业优先级，提升检修效率与响应速度。在实际应用中，当系统检测到运行状态异常，可自动分析故障类型与影响范围，生成最佳处置方案，并启动自恢复流程，实现故障隔离与负载重构。运维人员可远程操控虚拟模型验证控制效果，确保执行操作安全可靠。该机制降低了现场作业频率与安全风险，提升了系统稳定性与维护效率。

（三）典型电网突发状态下的应急联动控制应用

在突发负荷冲击或自然灾害等紧急情形下，数字孪生系统依托实时仿真能力，可快速评估电网扰动影响，并联动各关键设备完成动态调整。系统将突发状态下的应急预案与当前设备状态进行匹配，自动生成调控方案并进行多方案仿真对比，择优执行。通过联动控制模块，系统可自动完成断电、切换、保护装置启用等关键操作，实现快速应变。联动机制还可协同调度上级主网与下级配网资源，形成区域协同响应网络，保障局部系统的稳定运行与恢复能力，减少故障影响范围^[10]。

五、数字孪生驱动系统在智能变电站运行效果中的性能评价机制

（一）系统响应速度与预测准确率的对比分析

数字孪生驱动下的系统架构显著提升了对状态变化的感知速度与决策效率。依托实时数据流的快速处理与反馈机制，系统能够在异常初现阶段即做出响应，缩短从识别到处置的时间周期。预测模块则通过融合多源信息，提升状态变化趋势的预判能力，

增强运行安全冗余。与传统系统相比，预测结果更加精准、适应性更强，能够及时发现潜在故障隐患。响应速度与预测精度的同步提升，直接支撑了整个变电站运行的高可靠性和高效率，为后续功能模块提供坚实基础。

（二）运行能效指标与运维成本的量化评估

在系统运行过程中，数字孪生架构通过动态调控设备状态与负荷分配策略，有效降低了资源浪费与能量损耗。设备在最佳状态下运行，不仅延长使用寿命，也减少了频繁检修需求。系统对维护时机进行精准预测，提升了资源配置效率，缩减不必要的人工投入。平台的集中监控能力整合了多个运维环节，降低了运维成本构成的复杂度。长期来看，能效提升与维护优化将逐步显现效益，不仅体现在运行开销上，也体现于系统管理水平与稳定性的提升上。

（三）实际部署环境下的稳定性与扩展性检验

在实际部署中，系统需面对复杂电网环境、多设备协同与不确定工况。数字孪生平台通过模块化设计与自适应学习机制，增强了对多样场景的适配能力。在运行中即便遇到环境波动或硬件替换，系统仍能保持功能连续性与数据一致性。其开放式架构支持后续功能扩展与系统升级，便于引入新型设备与管理模块，满足未来电网技术发展需求。稳定运行能力保障了电网核心功能的持续性，而良好的扩展性也为智能变电站后续深化建设奠定基础。

六、结语

数字孪生技术为智能变电站的自动化系统设计提供了全新的发展路径，通过构建虚实融合的动态平台，实现了设备运行状态的精准感知、智能预测与自主控制，显著提升了系统的安全性与运行效率。面对传统系统存在的功能孤岛、信息滞后与集成难题，数字孪生以其高度的可视化、实时性与协同能力，构建了更具前瞻性、适应性的智能运维体系。未来，随着技术的不断深化与应用场景的拓展，数字孪生驱动的智能变电站将在电力系统智能化转型中发挥更加核心的作用。

参考文献

- [1] 杨庆, 孔纲强, 孔宪京, 等. 生成式人工智能驱动高等工程教育新生态的构建 [J]. 高等建筑教育, 2025, 34(1).
- [2] 同珺, 韩如成. 智能变电站综合自动化系统设计与实现 [J]. 电工技术, 2016, (07): 36-38.
- [3] 王新雷, 唐磊, 杨旭, 等. 数字孪生南水北调东线一期工程建设思路 [J/OL]. 南水北调与水利科技 (中英文), 2025.
- [4] 陈泽旭. 智能化技术在变电运维中的应用 [J]. 电子技术, 2025, 54(05): 336-337.
- [5] 孔鸿雁. 基于数字化电力工程容量及线路布局设计方法研究 [J]. 电力设备管理, 2025, (05): 251-253.
- [6] 李传明. 数字孪生技术在输变电线路智能巡检中的应用研究 [J]. 张江科技评论, 2024, (08): 72-74.
- [7] 王闯, 任大伟, 李彦澎, 等. 基于数字孪生的冷冻冷藏装备智能调控系统开发 [J]. 制冷与空调, 2023, 23(12): 85-90+96.
- [8] 张军六, 刘珊, 李瑞. 数字孪生技术下输变电设备运行状态智能感知 [J]. 计算机仿真, 2023, 40(12): 123-127+144.
- [9] 蒋建华, 田月伟, 罗显跃, 等. 基于数字孪生模型的输变电设备多源异构数据边缘侧智能采筛方法 [J]. 电工技术, 2022, (24): 95-98.
- [10] 李岚松, 于森. 电力运检智能化开启供电保障“数字时代” [N]. 盘锦日报, 2022-07-22(005).