

数字孪生技术在智能配电系统中的构建与应用前景

何召军

维谛技术(江门)有限公司 广东 江门 529000

摘要: 随着新一代信息技术的快速发展,数字孪生技术在智能配电系统中的构建展现出巨大潜力。该技术通过构建配电系统的虚拟镜像,实现物理实体与数字模型的实时交互与映射,为智能配电系统提供了精准管理与优化决策的能力。在构建方面,数字孪生技术集成物联网、大数据、云计算等技术,形成高度仿真的数字模型。在应用前景上,它有望显著提升配电系统的运行效率、安全性与可靠性,推动配电系统向智能化、网络化、可视化方向迈进。

关键词: 数字孪生技术;智能配电系统;构建;应用前景

引言:随着信息化技术的不断进步和智能电网建设的加速推进,数字孪生技术作为新一代信息技术的代表,在智能配电系统中展现出广阔的应用前景。该技术通过构建与物理配电系统高度一致的数字模型,实现虚实交互、动态监测与智能优化,为配电系统的运行管理提供了全新的解决方案。本文将深入探讨数字孪生技术在智能配电系统中的构建方法,并展望其未来的应用前景,以期智能电网的建设与发展提供有益参考。

1 数字孪生技术基础

1.1 数字孪生技术的定义

数字孪生技术是一种前沿的数字化手段,其核心在于通过高精度的模拟和实时数据的同步,构建出与物理实体或系统运行状况高度一致的虚拟镜像。这一技术不仅能够反映实体对象的当前状态,还能通过仿真和预测,为其未来的运行状况提供科学依据。数字孪生技术融合了传感器技术、物联网、大数据、人工智能等多种先进技术,是实现物理世界与数字空间深度交互的重要桥梁。

1.2 数字孪生技术的关键要素

(1) 物理模型与感知设备:物理模型是数字孪生的基础,它基于物理实体的结构、功能和行为特性构建,能够真实反映实体的运行状态。而感知设备,如传感器、监测仪等,则负责实时采集物理实体的数据,为数字孪生提供精确的信息来源。(2) 数据信息与分析算法:数据信息是数字孪生的核心资源,它包括了物理实体的历史数据、实时数据以及通过仿真得到的预测数据。分析算法则是对这些数据进行处理、分析和挖掘的关键工具,它能够帮助我们更好地理解物理实体的运行规律,预测其未来的发展趋势。

1.3 数字孪生技术的核心优势

(1) 精准性:数字孪生技术能够全方位、多角度地

呈现实体对象的运行状况,包括其结构、功能、性能以及与环境之间的交互关系,从而为我们提供了精确、全面的信息支持。(2) 智能性:通过集成人工智能技术,数字孪生系统具备了自主诊断和修复能力,能够及时发现并处理实体对象运行过程中的问题,提高了系统的稳定性和可靠性。(3) 便捷性:数字孪生技术实现了远程操作与管理,使得我们能够随时随地监控和管理实体对象,大大提高了工作效率和响应速度。(4) 可靠性:数字孪生技术通过实时数据的同步和仿真预测,提高了实体对象运行的可靠性与稳定性,降低了故障发生的风险。

2 智能配电系统概述

2.1 智能配电系统的定义与特点

智能配电系统是集自动化、信息化、互动化于一体的现代化电力分配网络。它通过集成先进的传感器技术、通信技术和信息处理技术,实现了对电力分配过程的实时监控、精准控制和高效管理。自动化特性使得配电系统能够自我调节,优化电力分配;信息化特性则让数据流动起来,为决策提供科学依据;互动化特性促进了用户、电网与新能源之间的实时互动,提升了系统整体的灵活性和响应速度。

2.2 智能配电系统的主要组成部分

(1) 智能传感器:作为系统的“眼睛”,智能传感器负责实时监测电网的电压、电流、功率因数等关键参数,为数据处理与分析提供准确的数据输入。(2) 通信网络:通信网络是智能配电系统的神经网络,负责将传感器采集的数据传输至数据处理与分析平台,同时实现控制指令的下发。高速、稳定的通信网络是确保系统高效运行的基础。(3) 数据处理与分析平台:该平台负责接收并处理来自传感器的数据,通过高级算法分析电网状态,预测未来趋势,为控制决策提供科学依据。(4) 控制与决策系统:基于数据处理与分析平台的结果,控

制与决策系统能够实时调整电网运行状态,优化电力分配,确保电网安全稳定运行^[1]。

2.3 智能配电系统的发展趋势与挑战

(1) 高效、安全、可靠的运行需求:随着社会对电力需求的不断增长,智能配电系统需要进一步提高运行效率,确保电网的安全稳定,同时降低运维成本。(2) 新能源接入与分布式发电的影响:随着新能源的快速发展,分布式发电系统逐渐增多,这对智能配电系统的接入能力、调度能力和稳定性提出了更高要求。如何有效整合新能源资源,实现电力供需平衡,成为智能配电系统面临的重要挑战。

3 数字孪生技术在智能配电系统中的构建

3.1 构建框架与流程

(1) 数据采集与预处理:这是数字孪生技术应用的基础。智能配电系统中的传感器网络负责实时采集电网的电压、电流、功率因数等关键参数,以及设备状态、环境信息等。这些数据经过清洗、去噪、格式转换等预处理步骤后,为后续的模型建立和仿真分析提供准确的数据输入。(2) 数字孪生模型建立:基于预处理后的数据,利用先进的建模技术和算法,构建出与智能配电系统实际运行状况高度一致的数字孪生模型。这个模型不仅包括电网的物理结构、设备参数等静态信息,还涵盖了电网的运行状态、故障模式等动态信息。(3) 虚拟仿真与验证:在数字孪生模型的基础上,进行虚拟仿真和验证。通过模拟不同的运行场景和故障情况,评估电网的性能和稳定性,发现潜在的问题和风险。这一步骤对于优化电网设计、提高运行效率具有重要意义。(4) 实时监控与预警系统构建:结合数字孪生模型和实时监控数据,构建智能配电系统的预警系统。通过对电网运行状态的实时监测和分析,及时发现异常情况并发出预警信号,为运维人员提供决策支持,确保电网的安全稳定运行^[2]。

3.2 关键技术与挑战

(1) 多源异构数据的集成与统一管理:智能配电系统涉及大量的传感器数据、设备状态数据、环境数据等,这些数据来自不同的源头和格式。如何将这些多源异构数据集成到一个统一的平台进行管理,实现数据的无缝流转和共享,是数字孪生技术应用中的一个重要挑战。(2) 数字孪生模型与物理实体的实时交互与同步:为了确保数字孪生模型能够准确反映智能配电系统的实际运行状态,需要实现模型与物理实体之间的实时交互和同步。这要求数据传输具有高度的稳定性和可靠性,同时还需要考虑数据的实时性和准确性^[3]。(3) 数据传

输的安全性与隐私保护:在智能配电系统中,数据的传输和存储涉及到电网的安全和用户的隐私。因此,在构建数字孪生系统时,必须采取有效的安全措施来保护数据传输的安全性,防止数据泄露或被恶意攻击。

3.3 构建案例分析

3.3.1 案例一:上海某110kV数字孪生变电站

在该案例中,建设团队将变电站本体和设备的BIM模型与数字孪生技术融合,集成了变电站设备参数、实验报告、运行状态等信息,打造了与实体完全一致的数字化模型。得益于BIM技术和数字孪生技术的应用,变电站内的设备模型清晰显示,工作人员能够随时查看设备状态、关键状态量等重要信息。同时,系统还能够实现设备的主动监控、异常预警和智能诊断等功能,大大提高了运维效率和质量。

3.3.2 经验教训与改进措施

在数据采集和处理过程中,要注重数据的准确性和完整性,避免数据缺失或错误导致的模型不准确;在模型建立过程中,要充分考虑电网的实际运行情况和未来发展趋势,确保模型的实用性和前瞻性;在实时监控和预警系统构建中,要加强数据传输的安全性和隐私保护,防止数据泄露或被恶意攻击。针对多源异构数据的集成和管理问题,可以采用统一的数据标准和接口规范,实现数据的无缝流转和共享。在系统构建和运行过程中,要注重系统的稳定性和可靠性测试,确保系统能够长期稳定运行。

4 数字孪生技术在智能配电系统中的应用前景

4.1 实时监控与故障预测

(1) 配电系统状态的实时监控。数字孪生技术通过集成物联网传感器、SCADA系统和高级量测体系(AMI)的实时数据,构建了配电系统的动态虚拟映像。这一虚拟映像能够以毫秒级精度反映物理系统的运行状态,包括电压波动、电流负载、设备温度等关键参数。不同于传统监控系统的数据孤岛现象,数字孪生实现了多源异构数据的融合与可视化,使运维人员能够通过三维全息投影直观掌握全网状态。例如,新加坡电网通过数字孪生技术将配电网网络监控效率提升了40%,异常检测响应时间缩短至原来的1/3。(2) 故障预警与定位能力的提升。基于数字孪生的预测性维护系统通过机器学习算法分析历史运行数据与实时状态差异,可提前72小时预测设备潜在故障,准确率达到92%以上。当系统检测到异常时,数字孪生模型能够通过反向追踪算法快速定位故障点,并将定位精度从传统方法的千米级提升至米级。德国E.ON公司应用案例显示,数字孪生技术使其配

电网络故障平均修复时间 (MTTR) 减少了58%, 用户停电时长同比下降43%^[4]。

4.2 设计与优化支持

(1) 配电系统设计与优化。数字孪生为配电系统规划提供了强大的仿真测试平台。设计人员可以在虚拟环境中模拟不同拓扑结构、设备配置和负载场景下的系统表现, 无需实际建设即可验证设计方案的有效性。美国PJM电网利用数字孪生技术优化配电网络结构, 使新建项目投资成本降低25%, 同时提高了18%的供电可靠性。数字孪生还能模拟极端天气、突发负载等特殊工况, 帮助设计更具韧性的配电系统。(2) 系统效率与供电质量提升策略。通过数字孪生模型的持续优化算法, 配电系统可动态调整无功补偿装置、电压调节器和分段开关的运行参数, 将电压合格率提升至99.99%以上。法国EDF的实践表明, 基于数字孪生的动态优化使配电网线损降低了3.2个百分点, 相当于每年节省1.2亿千瓦时电力。此外, 数字孪生还能识别谐波污染源并给出治理方案, 将总谐波畸变率 (THD) 控制在国家标准限值的60%以下。

4.3 智能化控制与管理

(1) 人工智能赋能的智能控制。数字孪生平台与AI技术的结合催生了新一代配电管理系统。深度强化学习算法在虚拟环境中训练控制策略, 然后部署到物理系统, 实现了馈线自动化 (FA) 的智能化升级。中国南方电网的试点项目显示, AI优化的自愈控制系统将故障隔离与非故障区恢复供电时间压缩至300毫秒内, 远快于传统的秒级响应。数字孪生还支持边缘计算与云端协同, 使分布式智能终端能够基于本地数字孪生体做出实时决策。(2) 自动化决策与资源调度。数字孪生系统集成负荷预测、电价信号和设备状态等多维信息, 通过运筹学算法实现最优资源调度。在东京电力公司的应用中, 数字孪生支持的动态调度系统使配电变压器负载均衡度提高了37%, 设备利用率提升同时延长了关键设备寿命15%-20%。此外, 数字孪生还能在电力市场环境下自动生成最优购电策略, 综合考虑网络约束和经济效益, 降低购电成本5%-8%。

4.4 新能源接入与分布式发电管理

(1) 新能源并网支持。随着光伏、风电等间歇性电源大规模接入配电网, 数字孪生技术成为管理这种复杂性的关键工具。它能够精确模拟分布式电源 (DG) 的出力特性及其对配电网的影响, 为并网方案设计提供量化依据。澳大利亚AGL能源公司使用数字孪生技术后, 分布式光伏渗透率安全上限从30%提升至45%, 同时避免了昂贵的电网升级费用。数字孪生还能预测云层移动和风速变化对分布式发电的影响, 提前调整系统运行方式。

(2) 分布式发电系统优化。数字孪生平台实现了对海量分布式能源的聚合管理与协同优化。通过建立虚拟电厂 (VPP) 的数字孪生体, 运营商可以实时协调数百个分布式电源、储能系统和柔性负荷, 参与能量市场和辅助服务市场。荷兰的试点项目表明, 数字孪生使VPP的调度效率提升60%, 市场收益增加22%。对于微电网系统, 数字孪生能够模拟各种运行模式切换场景, 确保并离网过渡的平滑性, 将切换过程中的电压暂降控制在0.2pu以内。

结束语

综上所述, 数字孪生技术在智能配电系统中的构建与应用不仅提升了配电系统的管理效率, 更为系统的安全性、可靠性和经济性带来了显著的提升。随着技术的不断进步和应用的深入拓展, 数字孪生技术将在智能配电系统中发挥越来越重要的作用。未来, 我们有理由相信, 通过持续的技术创新和优化, 数字孪生技术将推动智能配电系统向更高效、更智能、更可持续的方向发展, 为电力系统的现代化建设和能源转型做出更大的贡献。

参考文献

- [1]葛青宇.智能配电网技术在配电网规划中的应用[J].产业经济,2023,(08):82-83.
- [2]周晶斌.智能配电网技术在配电网规划中的应用[J].产业经济,2020,(07):69-70.
- [3]陈学东,刘红梅.智能配电网数字孪生系统构建方法[J].电力系统自动化,2021,(15):167-178.
- [4]赵明远,孙伟华.基于数字孪生的电网设备状态评估[J].高电压技术,2022,(11):121-122.