

数字孪生辅助下的智能配电网故障诊断及快速自愈系统

孙玉刚

河南理工大学 河南焦作

【摘要】数字孪生技术为智能配电网故障诊断及快速自愈提供了新的解决方案。通过构建物理电网系统的数字化镜像，实现对电网运行状态的实时监控和分析，从而提高故障诊断的准确性与响应速度。本文探讨了如何利用数字孪生技术优化配电网的故障检测、定位与恢复流程，以减少停电时间并提升供电可靠性。该系统能够显著提高配电网的故障处理效率，增强电网的安全性和稳定性。本研究为智能电网的发展提供了理论基础和技术支持。

【关键词】数字孪生；智能配电网；故障诊断；自愈系统；供电可靠性

【收稿日期】2025 年 1 月 20 日 **【出刊日期】**2025 年 2 月 18 日 **【DOI】**10.12208/j.jeea.20250060

Intelligent distribution network fault diagnosis and rapid self-healing system assisted by digital twin

Yugang Sun

Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan

【Abstract】Digital twin technology provides a new solution for the fault diagnosis and rapid self-healing of intelligent distribution networks. By constructing a digital mirror image of the physical power grid system, real-time monitoring and analysis of the power grid operation status can be achieved, thus improving the accuracy and response speed of fault diagnosis. This paper explores how to use digital twin technology to optimize the fault detection, location, and restoration processes of the distribution network, in order to reduce power outage time and enhance power supply reliability. This system can significantly improve the efficiency of fault handling in the distribution network and enhance the safety and stability of the power grid. This research provides a theoretical basis and technical support for the development of smart grids.

【Keywords】Digital twin; Intelligent distribution network; Fault diagnosis; Self-healing system; Power supply reliability

引言

数字孪生技术作为一种新兴的信息技术手段，正在电力系统等多个领域展现其独特价值，特别是在解决传统配电网故障诊断和自愈过程中的难题方面提供了全新思路。随着用电需求的增长和电网环境的日益复杂，快速准确地识别并修复故障成为当前电力系统的重要挑战之一。传统方法依赖人工巡检和经验判断，不仅耗时费力，也难以满足现代电网对高效性和精确性的要求。探索基于数字孪生技术的智能配电网故障诊断及自愈方案具有重要的现实意义。本文旨在分析数字孪生在智能配电网的应用潜力，提出一套完整的故障诊断与自愈机制，以提升电网运行效率和供电可靠性。

1 智能配电网故障诊断现状与挑战

智能配电网的故障诊断技术在现代电力系统中扮演着至关重要的角色。随着电网规模的不断扩大和复杂性的增加，传统的人工巡检和基于规则的自动化系统已难以满足高效、准确的故障检测需求。在复杂的电网环境中，各种因素如恶劣天气、设备老化以及人为操作失误等均可能导致电网故障的发生^[1]。这些故障不仅影响供电的连续性和稳定性，还可能对公共安全造成威胁。为了应对这些挑战，电网运营商不断寻求更加智能化的技术手段来提升故障诊断的效率与准确性。通过引入先进的传感器技术和数据分析方法，可以实现对电网运行状态的实时监控与分析，从而快速定位故障点并评估其影响范围。

现代智能配电网需具备高度可靠性和弹性，以确保在故障时迅速恢复供电。然而，当前的故障诊断系统依赖历史数据和静态模型，难以适应动态变化的实际电网环境。尤其是在分布式能源接入后，电网结构更加复杂多变，传统方法显得捉襟见肘。现有自愈机制耗时较长，无法满足关键用户的需求。结合最新信息技术如数字孪生成为提升故障诊断与自愈速度的关键。数字孪生通过构建物理电网的虚拟镜像，实现对运行状态的精确模拟和预测，为优化故障诊断提供了新途径。这种方法不仅提高了响应效率，还增强了电网应对突发状况的能力。

在实际应用中，利用数字孪生技术进行智能配电网的故障诊断和自愈不仅可以显著提高故障处理的速度和精度，还能有效降低维护成本。通过实时采集电网各节点的数据，并将其映射到数字孪生模型中，可以实现对电网健康状况的持续监测。一旦检测到异常，系统能够立即启动相应的诊断程序，快速识别故障类型和位置。基于数字孪生的自愈机制可以根据实时分析结果自动调整电网配置，最大限度地减少停电时间和范围。这种方式不仅能增强电网的安全性和稳定性，也为未来智能电网的发展奠定了坚实的基础。通过不断优化和完善这一技术，有望进一步提升配电网的智能化水平，更好地服务于现代社会的用电需求。

2 数字孪生技术在配电网故障检测中的应用探索

数字孪生技术革新了配电网故障检测，通过构建与物理电网一致的虚拟模型实现实时监控和分析。每个组件，从变压器到电缆，均被数字化复制，并经由传感器网络持续获取运行数据，包括电压、电流及温度、湿度等环境参数，全面评估电网健康状况。先进的数据分析算法可识别潜在故障迹象，如设备过热或异常波动，提前预警故障。这种方法不仅提升了故障检测的准确性和响应速度，还使运维人员能在故障发生前采取预防措施，有效减少意外停电风险，确保供电稳定性和安全性。

在实际应用中，数字孪生技术通过模拟不同情景下的电网行为，优化了故障检测流程。面对极端天气，该技术能预测受影响区域及可能出现的问题，助力精确维护计划的制定和应急响应策略的实施^[2-4]。利用历史故障数据，数字孪生系统不断自我优化，提高对新故障类型的识别能力。这种方法突破了传

统依赖经验判断的局限，实现了从被动应对到主动防御的转变。对于电网运营商，这意味着更高的运营效率、更低的维护成本，并显著增强了供电可靠性，满足现代社会对电力供应稳定性的严格要求。它还提升了电网应对突发事件的能力，保障了公共安全和服务质量。

进一步探索数字孪生技术的应用潜力，还需要关注如何更好地整合现有电网管理系统与新兴技术。这涉及到跨平台的数据交换、标准化接口的设计以及安全机制的确立等多个方面。通过建立开放且兼容的数字孪生平台，可以实现与其他智能系统的无缝对接，如能源管理系统和需求响应系统，从而形成更加综合的智能电网解决方案。在这种集成环境下，数字孪生不仅作为故障检测工具，更是整个电网智能化管理的核心组成部分。它促进了信息的透明化和决策的科学化，为实现高效、可靠、可持续的电力供应提供了强有力的支持。随着技术的不断发展，数字孪生将在未来的智能电网中扮演越来越重要的角色。

3 基于数字孪生的配电网自愈系统设计与实现

基于数字孪生的配电网自愈系统设计旨在通过虚拟模型与实际电网的实时交互，实现故障的快速定位、隔离和恢复。在这一系统中，数字孪生模型不仅精确复制了物理电网的所有组件及其连接关系，还集成了实时数据流，使系统能够动态反映电网运行状态^[5]。当检测到异常时，该系统利用内置算法迅速分析故障位置及其影响范围，并自动规划出最佳的修复策略。这种自动化处理机制显著缩短了停电时间，提升了供电可靠性。由于所有操作均基于精确的数据分析，避免了人为干预可能带来的误判风险，进一步增强了系统的稳定性和安全性。

为了确保自愈系统的高效运作，必须建立一个强大的数据管理框架，用于收集、存储和分析来自电网各节点的数据。这包括但不限于电压、电流、温度等参数，以及环境因素如湿度和风速等。通过大数据技术和机器学习算法的应用，系统可以识别出潜在的风险点，并预测可能出现的故障类型。智能传感器网络的部署对于提升数据采集的精度和覆盖范围至关重要。这些传感器持续监测电网状态，并将数据实时传输给数字孪生模型，以支持即时决策。结合地理信息系统（GIS），还可以对故障位置进行精确定位，指导现场维修人员快速到达并解决问题。这种集成化的

方法不仅提高了响应速度,也优化了资源配置。

实现基于数字孪生的配电网自愈系统还需考虑其与其他电力管理系统之间的兼容性问题。如何与现有的能量管理系统(EMS)、配电管理系统(DMS)有效整合,是保证整个电网智能化水平的关键。为此,需要制定统一的标准和协议,确保数据交换的顺畅和安全。网络安全也是不可忽视的一环,尤其是在涉及远程控制和自动化操作的情况下。通过采用加密技术和访问控制策略,可以有效防止未经授权的访问,保护系统免受恶意攻击。基于数字孪生的配电网自愈系统不仅是技术上的创新,更是管理模式上的革新,它为构建更加可靠、高效的智能电网奠定了坚实的基础。

4 数字孪生辅助下的配电网故障处理效果评估

在实际部署数字孪生辅助的配电网故障处理系统后,对故障处理效果进行科学评估显得尤为重要。这一过程不仅涉及对系统性能指标的量化分析,如故障检测时间、隔离时间和恢复供电速度等,还需要考察其对电网整体运行效率的影响。通过对比引入数字孪生技术前后各项关键性能指标的变化,可以直观地反映出新技术带来的改进^[6-8]。在某些试点项目中,利用数字孪生模型进行实时监控和故障诊断,使得平均故障定位时间大幅缩短,从原来的数小时减少至几分钟。这显著提升了故障响应速度,减少了停电时间,提高了用户的满意度。

除了提升故障处理速度外,数字孪生辅助下的配电网还表现出更高的自愈能力和更强的适应性。具体而言,该系统能够根据实时数据动态调整电网配置,优化电力资源分配,从而在发生局部故障时迅速恢复正常供电。通过对历史故障数据的学习,数字孪生系统不断自我优化,增强了对未来潜在问题的预见能力。这种基于数据驱动的方法有助于制定更加精准的维护计划,降低了长期运营成本。系统的高适应性也体现在面对极端天气或突发事件时,能够快速做出反应,有效减少灾害对电网的冲击。

为了全面评估数字孪生技术在配电网故障处理中的应用效果,还需考虑经济效益和社会效益两方面。从经济角度来看,虽然初期投资较大,但考虑到因减少停电时间和提高设备利用率所带来的长期收益,总体成本效益是正面的。社会层面,则体现在提升了公共安全和服务质量,尤其是在关键基础设施

领域,稳定可靠的电力供应至关重要。综合这些因素,可以看出数字孪生技术为智能配电网带来的不仅是技术上的进步,更是管理理念和服务模式的革新,它预示着未来电网发展的一个重要方向。

5 结语

数字孪生技术为智能配电网的故障诊断与自愈提供了创新解决方案,通过实时监控与数据分析显著提升了故障处理效率和供电可靠性。其应用不仅缩短了停电时间,还优化了电网资源配置,降低了运营成本。随着技术的不断进步,数字孪生将持续推动电网向更加智能化、高效化方向发展,为构建安全稳定的电力供应体系奠定坚实基础,满足现代社会对能源管理的高标准需求。

参考文献

- [1] 莫崇德.基于数字孪生的超高层建筑火灾疏散路径规划研究[D].北方工业大学,2024.
- [2] 李清蕾.基于数字孪生的智能制造产品设计与定价决策[D].沈阳工业大学,2024.
- [3] 王浔.基于数字孪生的无人机辅助车联网计算卸载技术研究[D].东莞理工学院,2024.
- [4] 陈子康.基于数字孪生的车联网边缘计算卸载机制研究[D].电子科技大学,2024.
- [5] 顾伟.面向边缘计算的智能任务调度方法研究[D].北京信息科技大学,2024.
- [6] 胡宸.基于数字孪生的无人机辅助车联网任务卸载研究与实现[D].北京邮电大学,2024.
- [7] 王中贝.数字孪生技术道德化研究[D].中国科学技术大学,2023.
- [8] 石琨,刘朋矩,杜治钢,等.数字孪生辅助的智能楼宇多模态通信资源管理方法[C]//中国电机工程学会电力信息化学专业委员会,国家电网公司信息通信分公司.2022 电力行业信息化年会论文集.华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室;广州城市理工学院;北京芯智微电子科技有限公司;中国电力科学研究院新能源研究所;国网冀北电力有限公司,;2023:604.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS