

基于数字孪生的电力系统灾变演化模拟与应急调度决策支持系统

雷伟星

苏州协鑫新能源运营科技有限公司河南分公司, 河南省郑州市, 450018;

摘要: 随着现代电力系统规模扩张、结构复杂性提升, 自然灾害、设备故障、人为失误等引发的潜在安全风险日益凸显。近年来兴起的数字孪生技术提供创新路径, 它构建与物理电力系统一致的虚拟数字模型, 实现实体与数字空间融合交互, 能感知电网运行状态, 基于多源数据和智能算法动态预测系统运行趋势、精准推演灾变过程。这种虚实结合手段为理解电力系统灾变机理、评估潜在风险、制定应急调度方案提供理论和技术支撑。

关键词: 数字孪生; 电力系统; 灾变演化模拟; 应急调度决策; 支持系统

DOI: 10. 64216/3080-1508. 25. 08. 019

引言

随着全球气候变化和人类活动加剧, 电力系统面临的不确定性因素增多, 极端天气、设备故障等风险源可能引发连锁反应导致灾变。传统静态分析方法和经验驱动的应急响应措施已难以应对。数字孪生技术凭借强大的数据集成能力和实时仿真特性, 为电力系统灾变研究和应急管理带来新活力。构建电力系统数字孪生模型, 可实现对物理系统的动态映射, 还原运行状态、预测潜在风险演变路径, 为决策者提供更全面精准的信息支持。该技术应用标志着电力系统管理正迈向智能化、精细化。

1 数字孪生的核心内涵

数字孪生并非简单的“虚拟复刻”, 而是由物理实体、虚拟模型、数据链路、服务应用四大核心要素构成的动态协同系统。其核心内涵在于“全要素映射、实时交互、闭环优化”: 物理实体是映射对象, 涵盖电力系统中的发电机、变压器、输电线路等设备及其整体网络拓扑; 虚拟模型需还原物理实体的几何形态、物理特性、运行规律, 且具备随物理实体状态变化而动态更新的能力——不同于传统静态模型, 数字孪生虚拟模型需融合多物理场、多时间尺度特性, 例如在描述输电线路时, 既要体现其机械结构(如杆塔强度), 也要反映电磁特性(如阻抗、容抗)及热特性(如载流发热)。数据链路是连接物理与虚拟的关键, 需通过传感器、边缘计算设备采集物理系统的实时运行数据(如电压、电流、温度、振动), 并借助高速通信网络(如 5G、光纤)实现数据实时传输, 同时将虚拟模型的仿真结果、决策指令反向反馈至物理系统, 形成“数据采集-模型更新-仿真

分析-指令执行”的闭环。服务应用则是数字孪生价值的体现, 在电力系统灾变场景中, 具体表现为灾变演化模拟、应急调度决策、设备健康管理等功能, 其本质是通过虚实协同提升物理系统的运行韧性。

2 电力系统灾变演化模拟方法

2.1 电力系统灾变演化的驱动机制

电力系统灾变演化是外部扰动与内部脆弱性共同作用的结果, 其驱动机制可从“扰动触发-故障蔓延-系统失稳”三阶段解析。外部扰动是灾变初始诱因, 分自然与人为扰动: 自然扰动中, 台风致输电线路舞动、杆塔倒塌, 覆冰增加线路重量与阻抗, 雷击引发绝缘子闪络; 人为扰动包括误操作、设备检修不当等, 虽概率低但可能直接触发关键设备故障。内部脆弱性是灾变蔓延“助推器”, 体现在三方面: 一是网络拓扑脆弱性, 如环网结构缺失使线路故障后无法转移负荷; 二是设备性能脆弱性, 如老旧变压器抗过载能力不足, 负荷转移时易绝缘损坏; 三是控制策略脆弱性, 如传统保护装置整定参数未考虑新能源并网谐波影响, 可能导致保护误动, 加剧故障蔓延。灾变蔓延遵循“局部故障-连锁反应-系统失稳”路径: 局部故障发生后, 若保护装置未及时隔离, 故障电流会扩散, 如输电线路故障跳闸后负荷转移使并联线路过载, 若保护装置动作延迟, 会形成“故障链式传播”; 当故障蔓延至关键节点, 会致系统频率、电压大幅波动, 若频率低于 49.5Hz 或电压低于 0.8pu, 且调频、调压措施失效, 系统将失稳, 表现为大规模负荷切除、机组解列甚至全网崩溃。需注意, 灾变演化有“非线性”特征, 扰动强度与灾变后果非线性关系, 如

覆冰厚度增加 10%可能使线路故障概率提升 50%，这种非线性源于多因素耦合与系统状态动态变化。

2.2 基于数字孪生的灾变演化建模方法

基于数字孪生的灾变演化建模，核心是构建“物理-虚拟”动态适配的模型体系，与传统离线建模不同，关键在于“实时性、多维度、可演化”。模型构建遵循“分层映射、多场耦合”原则：分层上，覆盖设备级、节点级、系统级。设备级模型聚焦单一设备灾变响应，如输电线路覆冰力学模型、变压器热过载模型；节点级模型关注局部节点故障传播，如变电站断路器故障对母线电压的影响；系统级模型从全网视角分析故障蔓延对系统整体影响。多场耦合建模是还原灾变真实过程的核心，需处理电磁-机械、电磁-热、气象-机械三类耦合关系。为实现“可演化”，建立动态更新机制：一方面通过实时数据修正模型参数，如用 PMU 采集的线路电流数据更新线路阻抗参数；另一方面基于历史灾变数据优化模型结构，如根据既往覆冰灾害调整覆冰力学模型载荷系数。此外，模型需具备“场景适配性”，针对不同灾变类型调整核心参数与耦合关系，如台风场景强化风速对线路舞动影响模型，覆冰场景突出温度、湿度与覆冰厚度关联模型。

2.3 灾变演化的仿真分析技术

灾变演化仿真分析是将数字孪生模型转化为灾变预测能力的关键，需解决“大规模、实时性、不确定性”三大技术难点。并行计算技术是应对大规模系统仿真的核心，电力系统节点和支路众多，传统串行计算难以短时间完成灾变蔓延仿真。并行计算将仿真任务分解为子任务，分配至不同计算节点同时运算，再融合结果得到全网结论，如采用基于 MPI 的并行计算框架，可提升计算效率 4-6 倍，满足实时仿真需求。不确定性分析技术用于量化扰动随机性对仿真结果的影响，灾变演化初始扰动有随机性，传统确定性仿真难以覆盖所有场景。不确定性分析采用“概率仿真”方法，通过蒙特卡洛模拟生成大量扰动场景，进行灾变仿真并统计指标，得到灾变后果概率分布，为应急调度提供风险量化依据。仿真结果的可视化与量化评估技术提升仿真结果可用性，可视化将抽象数据转化为图形展示，如用动态拓扑图呈现故障蔓延路径、热力图展示负荷损失分布；量化评估建立多维度指标体系，通过指标加权计算得出灾变严重程度评分，为应急调度优先级判断提供依据，如某区域评

分达 0.8 时列为一级应急响应区域，优先调配抢修资源。

3 应急调度决策支持系统设计

3.1 系统的总体架构

应急调度决策支持系统依托数字孪生技术，构建“分层协同、闭环联动”总体架构，从下至上分物理层、数据层、模型层、应用层四层，各层通过标准化接口实现数据与指令双向流转。物理层是“感知终端”，由电力系统物理实体（如发电机、输电线路等核心设备及新能源场站等柔性调节资源）与数据采集设备（如 PMU、SCADA 等）组成，负责实时采集运行、设备状态与环境数据，为上层分析提供基础。数据层是“数据中枢”，采用“时序数据库+关系数据库”混合存储架构，承担数据存储、预处理与融合任务，通过滤波、缺失值填补等算法处理数据，用多源数据融合技术整合数据，避免冗余与矛盾。模型层是“决策核心”，含数字孪生基础、灾变演化模拟、应急调度决策三类核心模型，三类模型通过数据接口联动，实现数据传递与反馈。应用层是“功能出口”，面向调度人员提供可视化操作与决策支持功能，包括实时态势展示等模块，设计遵循“人机协同”原则，确保决策灵活可靠。

3.2 应急调度的多目标决策模型构建

应急调度决策要平衡多个相互制约的目标，多目标决策模型核心为“明确目标体系、量化目标权重、构建约束条件”。目标体系要覆盖电力系统灾变应对核心需求，有三个一级目标：最小化负荷损失，即合理切除、转移负荷，减少停电范围，保障重要负荷；最小化调度成本，涵盖新能源出力调整、储能充放电、备用电源调用成本，避免经济浪费；最大化系统恢复速度，即优化抢修资源分配和机组重启顺序，缩短系统恢复时间。各一级目标要分解为可量化的二级指标，如“最小化负荷损失”分解为“重要负荷损失率”“总负荷损失率”等。目标权重分配考虑不同灾变场景优先级差异，采用“主观+客观”结合的方法：主观权重用层次分析法（AHP）确定，由调度专家、技术人员组成评价矩阵打分，如极端寒潮场景中“最小化负荷损失”权重更高；客观权重用熵权法确定，基于历史灾变数据计算各目标指标信息熵，熵值越小权重越高；最终综合得到各目标最终权重。约束条件反映电力系统运行规律与安全要求，包括物理、操作、政策约束；构建模型时要明确如“发电机出力不

超额定容量 110%”等约束,确保调度方案有物理可行性。

3.3 实时态势感知与灾变预警模块

实时态势感知与灾变预警是应急调度的“前置环节”,需实现“数据实时采集-信息融合分析-风险预警输出”快速响应。实时数据采集依托泛在电力物联网,构建感知网络:发电侧采集机组出力等数据,采样频率不低于 1Hz;输电侧通过 PMU 采集线路同步数据,采样频率达 50Hz;配电侧采集配网负荷等数据,采样频率不低于 0.5Hz;同时采集气象与地理信息数据。数据融合分析解决多源数据“异构性、冗余性、不确定性”问题,采用分层融合策略,先数据级融合,再特征级融合,最后决策级融合;引入卡尔曼滤波算法消除噪声,用贝叶斯估计处理不确定性。灾变预警建立完整体系:预警指标覆盖系统运行与灾变风险,如线路过载率等;预警等级分四级;触发机制采用双重模式,实时指标超阈值或 AI 模型预测未来 15 分钟内指标超阈值时触发预警。预警输出同步推送至应用层界面与调度人员移动终端,确保信息及时触达。

3.4 调度方案的生成与优化模块

调度方案的生成与优化要实现“快速生成-多场景适配-动态优化”,核心是融合启发式算法与数字孪生仿真验证。方案生成采用“分层生成+多算法协同”策略,先“粗调度”,基于灾变预警与系统约束快速确定调度方向,如某区域线路过载时,优先考虑新能源出力调整、储能放电、负荷转移;再“细调度”,用启发式算法(如遗传算法、粒子群优化算法)生成具体方案。

多场景适配需考虑灾变程度差异,轻度灾变(如单条线路故障,负荷损失<5%)聚焦“局部调整”,如储能放电弥补缺口;中度灾变(如多条线路故障,负荷损失 5%-15%)结合“负荷转移+备用电源调用”,如转移负荷并启动柴油发电机;重度灾变(如区域电网崩溃,负荷损失>15%)包含“机组重启+网络重构+负荷分级恢复”,如先重启发电厂,再重构电网拓扑,最后分级恢复供电。

方案优化具有动态性,通过“仿真验证-反馈修正”闭环进行。将方案输入数字孪生模型验证,若不满足约束或未达目标,分析偏差原因,调整算法或模型参数,重新生成方案直至满足要求。同时,方案优化需考虑“时间敏感性”,灾变初期(0-30 分钟)快速生成近似最优

方案保障系统稳定;中期(30 分钟-2 小时)多轮优化提升经济性;后期(2 小时后)聚焦系统恢复速度,优化抢修资源与调度方案协同。

3.5 系统的人机交互与决策支持输出

人机交互与决策支持输出是连接系统与调度人员的“桥梁”,要兼顾“专业性、易用性、交互性”,确保调度人员高效利用系统决策支持功能。人机交互界面设计采用“分层展示+定制化布局”:第一层“全局态势界面”以电网拓扑图为基础,用颜色标注设备状态,叠加负荷损失热力图、气象预警信息,助调度人员掌握整体情况;第二层“详细数据界面”提供实时数据查询、历史数据对比、模型参数调整入口;第三层“决策支持界面”展示调度方案列表、方案仿真结果、风险提示。决策支持输出采用“多形式推送+交互式调整”:推送形式有文本指令、图形化方案、量化分析报告;交互式调整允许调度人员修改方案并触发系统重新验证。此外,系统具备“决策追溯”功能,记录方案生成过程、调度人员调整操作、方案执行结果,形成决策日志,便于复盘分析与责任追溯。为提升交互效率,界面支持快捷键操作、多屏联动,同时提供操作指引,降低调度人员学习成本。

4 结语

数字孪生技术应用于电力系统灾变应对,提升了系统韧性与应急能力,为电力系统智能化发展提供新方向。通过虚实协同闭环机制,数字孪生支持灾变预警到应急调度全流程,降低灾变损失。但新能源大规模并网、负荷特性多样化带来新挑战,数字孪生模型的精度、实时性与适应性有待提升。未来研究可聚焦多源异构数据深度融合、复杂场景下模型自学习能力及跨区域协同调度实现路径,推动该技术在电力系统更广泛应用与价值释放。

参考文献

- [1] 郭庆杰. 基于数字孪生的电力系统灾变演化模拟方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(3): 1-7.
- [2] 陈杰. 浅析数字孪生的电力系统应急调度决策支持系统[J]. 电力科学与技术, 2024, 45(1): 1-6.
- [3] 刘畅. 数字孪生技术在电力系统故障诊断中的应用[J]. 电力系统自动化, 2024, 44(12): 1-6.