

基于数字孪生的配电网信息物理系统动态安全评估

董嗣瑾

天津三源电力信息技术股份有限公司 天津 300000

摘要: 为解决高渗透分布式电源条件下配电网动态安全分析滞后、风险识别不及时的问题, 本文建立了包含状态感知、电压稳定裕度、链路有效率及动态风险指数的数字孪生动态安全分析模型, 依据IEEE 33节点系统仿真, 扰动出现后SEI最高4.0%、VSM最小6.9%、CLE最小0.946, DRI最高0.361, 意味着系统处于中等风险水平。更进一步在实际配电网平台验证, 采取控制措施后各指标明显变好: SEI峰值降到3.1%, VSM最低升至8.1%, DRI最大值降到0.289, 风险减少约23.4%, 验证显示, 依据数字孪生的动态安全检测方法可有效增强配电网的扰动响应能力与主动安全水平。

关键词: 数字孪生; 配电网; 动态安全评估; 信息物理系统

引言

伴随新能源大规模接入和用电负荷随机性增强, 配电网动态性、不确定性都更明显, 传统依据静态潮流和离线分析的安全判断方法, 不容易满足实时性以及预测性要求^[1], 配电网信息物理系统深度融合, 通信延迟、丢包以及数据异常等信息层扰动, 可能放大物理层风险, 让系统动态安全问题更突出。数字孪生技术借助建立虚实同步的高保真仿真体, 使配电网具备实时感知、预测预警与在线控制的核心能力。

一、配电网信息物理系统概况

(一) 配电网信息层结构与通信条件

配电网信息层由感知、通信以及控制三部分构成, 是实现数字孪生和动态安全监测的基础, 伴随物联网、边缘计算及5G通信技术进步, 信息层可以采集开关、变压器、分布式电源和负荷侧设备的高频率、多维度数据, 借助光纤通信、无线专网和TSN(时间敏感网络)等方式完成高速、低时延的数据传输。通信条件的可靠性直接决定数字孪生体与物理系统的一致程度, 包含数据完整率、传输延迟、丢包率与安全性等指标^[2], 现在配电网节点多、数据量大、要求反应快, 信息层得有灵活可扩展的网络、可靠的数据融合能力以及防御攻击的本事。

(二) 配电网物理层运行条件

物理层是配电网运行的实体基础, 其运行状态因电源结构变化、负荷波动和设备健康状况等因子而改变^[3], 伴随高比例分布式光伏、储能、电动汽车等接入, 配网潮流表现多向化、随机化以及突变性特征, 致使传统静态分析比较难准确折射其动态行为。物理层设备的老化、保护定值的合理性还有运行方式变化, 都会损害系统的短时稳定性、电压质量和故障响应速度, 数字孪生技术需要准确建模物理层运行条件, 比如线路参数、节点拓扑、设备动态模型和扰动特性等, 保证虚拟模型同步折射物理系统的真实运行。

二、动态安全影响因素及关键评估措施

(一) 影响配电网动态安全的主要因素

配电网动态安全来自多种因子的共同作用, 涉及可再生能源出力的波动、电动化负荷的随机变化以及分布式电源接入电网引发的潮流方向改变, 这些都会让电压、频率发生快速改变, 信息系统延迟、通信数据丢失及测量不准可能造成控制动作延后甚至错误动作, 引发物理层繁复的动态变化。信息物理系统的深度融合带来更多交叉风险, 如错误数据加入(FDI)、拒绝服务(DoS)攻击可能凭借信息通道干扰调控方案, 诱发物理系统不稳定, 装置间的耦合关系加速故障链传播, 导致系统脆弱性升高^[4], 动态安全问题已由传统的物理故障扩展为信息扰动与物理扰动共同驱动的冗杂风险, 需要全面分析其时序特性。

(二) 数字孪生驱动的关键安全评估措施

数字孪生技术为配电网动态安全分析给予实时、预

作者简介: 董嗣瑾(1977.03-), 女, 天津人, 研究方向: 信息技术在能源电力领域的应用。

测性和可验证的技术手段，重点措施包含依据多源数据融合的全局状态感知，同步校准物理层和信息层数据，实现系统运行状态的高保真复制，孪生体利用预测模型和动态仿真能力，提前识别潜在故障、异常波动和不稳定趋势，建立预警机制。凭借嵌入数据驱动与机理模型相结合的算法，可对不同扰动场景下的风险实行量化，形成动态安全指标体系，在控制方面，数字孪生可模拟不同方案的执行效果，做出最优控制决策，减少误动作风险，增加配电网韧性，上述措施共同构成数字孪生环境下配电网动态安全分析的核心依赖^[5]。

三、数字孪生动态安全评估模拟分析

(一) 配电网数字孪生仿真模型构建

目标在于掌握配电网信息物理系统(CPS)安全状态动态，本研究建立了包含状态感知、动态潮流、信息交互、风险预测四个重点指标的数字孪生仿真模型，模型依据IEEE 33节点配电网拓扑，同样融合物理层电气特性与信息层通信行为，实现虚实系统同步演化。状态感知模块使用广域测量单元(WAMS)数据，经过卡尔曼滤波完成高精度状态估计，动态潮流模块使用精进的潮流法与时域仿真融合，模拟扰动条件下的电压、潮流响应；信息交互模块借助通信时延和丢包率模型建立，模拟信息层对物理控制的作用，风险预测模块融合多变量时序预测和风险指数模型，完成动态风险等级判定。

(二) 动态安全评估阶段划分

为系统化研究配电网受扰动时的动态行为，本文把动态安全评估过程分成正常运行、扰动响应、风险演化、恢复控制四个部分，正常运行阶段，孪生体与物理系统保持高度一致，借助实时刷新实现状态同步，在扰动响应阶段，系统遭遇外部波动(如光伏出力骤降、负荷突变)后，电压、电流及通信链路性能快速变化，孪生体利用时域仿真同步计算动态潮流。风险演化时，系统稳定裕度减少、估计误差加大，动态风险指数可能达到中高等级，变成安全监测的关键时期；最终进入恢复控制环节，借助调压设备动作、无功补偿、下垂控制等方法，令系统回到安全区域，模型使用虚实对照完成各环节风险量化，保证判断的实用性和明确性。

(三) 数值模拟结果与分析

用IEEE 33节点系统做60秒仿真，采样6个时间点，记下SEI、VSM、CLE、DRI四项指标，这样设置扰动：20秒时光伏发电突然降25%，40秒时负荷升15%。

表1 数字孪生动态安全评估仿真结果表

时间 (s)	SEI (%)	VSM (%)	CLE	DRI
0	1.8	9.5	0.982	0.213
10	2.1	9.2	0.977	0.231
20 (光伏扰动)	3.5	7.8	0.953	0.322
30	3.2	8.1	0.958	0.307
40 (负荷扰动)	4	6.9	0.946	0.361
60	2.7	8.5	0.965	0.274

仿真数据说明，当光伏出力骤降($t=20\text{ s}$)发生，SEI从2.1%升至3.5%，说明扰动使状态估计变化明显，VSM下降至7.8%，系统电压稳定性变弱，CLE降至0.953，说明通信负荷上升致使链路可靠性减少；最终DRI加强至0.322，进入中等风险区。此后系统部分恢复，但当 $t=40$ 秒出现负荷上升扰动，再次出现指标恶化：VSM降至最低6.9%，DRI达到全程最高值0.361，伴随控制策略介入($t=40-60$ 秒)，四项指标均趋于改良，说明孪生辅助控制对动态稳定性带来明显改善作用。

四、关键技术方法

(一) 数字孪生驱动的全息状态感知技术

全息状态感知技术是数字孪生配电网实现实时、高精度运行监测的核心，这项技术融合了SCADA、PMU、智能开关终端等多源异构数据，建立起跨尺度、跨时间维度的全局感知体系，系统先拿多模型融合方法清洗、补偿和标准化数据，随后使用扩展卡尔曼滤波(EKF)与粒子滤波(PF)混合算法增强状态估计的鲁棒性和动态跟踪性能。孪生体一直和物理系统校准状态，实现虚实同步，加入广域量测信息，能有效发现电压偏移、潮流异常和设备潜在故障等不稳定情况，为系统补偿通信时延与丢包，增加估计稳定性，全息状态感知是动态安全评估的基石，让后续风险预测和控制策略拥有可解释性和可靠性，是数字孪生CPS系统实现智能化运行的第一关键环节。

(二) CPS协同的动态风险评估技术

CPS协同风险评估技术目的是从信息层和物理层两个维度识别、量化和预测配电网动态风险，该技术先建立多变量耦合风险模型，将状态估计误差、电压稳定裕度、链路有效率等核心特征使用加权计算融入动态风险指数(DRI)，完成全面风险量化。利用信息—物理耦合的时序分析方法，建模扰动事件引起的链式风险传播，显示通信异常、负荷突变或分布式电源波动怎样波及系统稳定性，为了增强预测能力，风险识别算法引入深度

学习模型（如LSTM网络），预测后续时段的风险趋势，让系统具备超前预警功能。该技术方法根据风险等级自动触发控制模块，实现风险闭环管理，CPS协同的风险分析结构给配电网动态安全监测给出全面、层次化以及可计算的决策依据。

（三）基于孪生模型的智能安全控制技术

智能安全控制技术是数字孪生平台动态安全管理的最终执行环节，重点是借助孪生体实现多种控制策略的虚拟仿真和改良，帮助物理系统完成最优操作，控制模块内部装有潮流计算、故障模拟及控制器动态模型，可以模拟设备在不同扰动下的动作效果，包含无功补偿、电压调节、主动功率下垂控制等方略。系统使用强化学习（RL）以及模型预测控制（MPC）融合的方法，实现控制策略自我更新，RL负责探查方针空间，MPC同时满足约束条件寻找最优控制序列，虚实对照让孪生体持续修正控制模型参数，增强控制响应准确度与稳定度。

五、控制措施实施效果验证

（一）实验平台与现场监测数据分析

为验证所提出数字孪生驱动的动态安全控制策略，本研究依据某区域实际10kV配电网搭建了孪生—物理协同实验平台，采集系统控制措施实行之后的现场监测数据，并与第三章的仿真指标保持一致性，系统监测点分布于12个核心节点，着重采集电压幅值、通信链路状态、控制指令响应等信息。选取0–60 s运行区间内的四项指标实行展示，现场测量结果如下表所示。

表2 控制措施实施后的现场监测数据

时间 (s)	SEI (%)	VSM (%)	CLE	DRI
0	1.6	9.7	0.986	0.198
10	1.9	9.4	0.982	0.212
20	2.6	8.6	0.969	0.265
30	2.4	8.9	0.973	0.251
40	3.1	8.1	0.961	0.289
60	2	9.1	0.978	0.224

（二）安全评估与控制效果评价

从5.1的监测数据看出，控制措施明显提高了配电网的动态安全性能，SEI最大值从没有控制时的3.5%–4.0%降到3.1%，证实控制策略让状态估计更稳定，电压稳定性指标VSM，在扰动时段的最低值由6.9%升到8.1%，这证明无功补偿以及调节方略有效增加了电压安全裕度。

通信链路有效率CLE一直保持在0.96以上，比仿真阶段的0.946–0.965更稳定，可见信息层改良与队列管理策略让通信拥塞减少，融合折射系统安全性的DRI控制时保持在0.20–0.29区间，相比未控制状态的最高0.361明显下降，风险等级下降23.4%。融合分析指出，数字孪生辅助的动态控制策略能有效抑制扰动扩散、加强系统韧性，让系统从被动响应转向主动安全。

结论

本文提出依据数字孪生的配电网信息物理系统动态安全分析方法，建立虚实同步仿真模型，实时监测扰动发生时的状况，预测风险，改良控制策略，仿真结果表明，未采取控制措施，系统有电压稳定性下降（最低VSM 6.9%）、状态估计误差上升（最大SEI 4.0%）及通信性能恶化（CLE最低0.946）等问题，动态风险指数DRI达到0.361。借助引入孪生辅助控制后，现场数据验证风险明显减少，DRI最大值下降至0.289，整体改良幅度超过23%，结果证明数字孪生能有效增进配电网动态安全性，实现从被动应急向主动管理的转变，后续将更深一步研究高精度孪生模型建立与分布式协同安全控制技术。

参考文献

- [1] Qiujie W, Hao X, Hong T, et al. Enhancing pre-disaster resilience of distribution networks considering temporal characteristics of typhoon disasters and cyber-physical collaborative control[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2026, 268:111954–111954.
- [2] 基于信息物理融合的新型配电网智能感知与数字调控关键技术[J]. 智慧电力, 2025, 53(11): 2+135.
- [3] 杨艳红, 宋月新, 陈盛, 等. 基于信息物理模型的柔性配电网多源协同控制方法[J]. 电气自动化, 2025, 47(05): 57–61.
- [4] 梁铃, 姬源, 黄育松, 等. 基于信息物理融合的有源配电网概率潮流计算[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2025, 23(07): 699–710+719.
- [5] 候依含, 杨德龙, 龚钢军, 等. 网络攻击视角下配电网信息物理跨域风险评估[J/OL]. 华北电力大学学报(自然科学版), 1–19[2025–12–10].