

# 面向电力系统安全约束经济调度的数字孪生方法

段晓娟

国网甘肃省电力公司平凉供电公司

DOI:10.32629/etd.v6i12.19240

**[摘要]** 面向电力系统安全约束经济调度的数字孪生方法,通过构建物理电网的高精度数字映射体,实现“数据驱动、虚实交互、动态优化”。该方法融合多源数据与高精度建模,精准量化新能源出力不确定性及安全约束,结合改进模型预测控制与强化学习算法,提升调度方案的经济性与实时性。实践表明,其可降低弃风弃光率、减少设备运维成本,显著提升电网运行效益与安全水平。

**[关键词]** 电力系统; 安全约束; 经济调度; 数字孪生方法

**中图分类号:** TM73 **文献标识码:** A

## Digital Twin Method for Security-Constrained Economic Dispatch of Power Systems

Xiaojuan Duan

Pingliang Power Supply Company, State Grid Gansu Electric Power Co., Ltd.

**[Abstract]** The digital twin method for security-constrained economic dispatch of power systems achieves “data-driven, virtual-real interaction, and dynamic optimization” by constructing a high-precision digital mapping of the physical power grid. This method integrates multi-source data and high-precision modeling, accurately quantifies the uncertainty of new energy output and security constraints, and combines improved model predictive control and reinforcement learning algorithms to enhance the economy and real-time performance of dispatch schemes. Practice shows that it can reduce wind and solar curtailment rates, decrease equipment operation and maintenance costs, and significantly improve power grid operation efficiency and security levels.

**[Key words]** power system; security constraint; economic dispatch; digital twin method

### 引言

随着新型电力系统建设加速,高比例新能源接入与复杂运行工况对传统调度模式提出严峻挑战。安全约束经济调度需兼顾供电可靠性、经济性与新能源消纳,但现有方法存在安全约束动态表达不足、计算效率与精度失衡等问题。数字孪生技术通过构建物理电网的虚拟镜像,实现数据实时交互与多场景仿真,为解决调度决策的实时性、可解释性与多目标协同难题提供了新范式,成为提升电网智能化水平的关键路径。

### 1 数字孪生驱动的调度框架设计

#### 1.1 数字孪生概念与电力系统适应性分析

(1) 定义: 数字孪生是通过物理系统、虚拟模型、数据交互与服务应用构建的闭环系统。其中物理系统涵盖电力系统全量实体设备与运行环境,虚拟模型实现对物理系统的精准映射,数据交互依托传感网络与通信技术实现虚实实时联动,服务应用则基于虚实融合数据提供调度决策支撑,形成“感知-建模-决策-反馈”的完整闭环。(2) 电力系统调度中的核心需求: 一是实时性,需精准捕捉电网运行状态动态变化,保障调度指令快速响

应;二是可解释性,调度决策需清晰关联电网运行机理,为运维人员提供明确依据;三是多目标协同,需统筹平衡供电可靠性、经济性与新能源消纳等多元目标,实现电网整体最优运行。

#### 1.2 总体框架设计

(1) 物理层: 涵盖发电、输电、配电、用电全环节实际电网设备,通过部署各类传感设备实时采集设备运行参数、环境数据等,精准感知物理电网的真实运行状态,为后续虚拟建模与调度决策提供基础数据支撑。(2) 虚拟层: 构建多尺度孪生模型库,包含电网元件级、区域级、全网级等不同尺度模型。基于物理层数据实现虚拟模型与物理系统的动态同步,支持电网运行状态模拟、故障推演与调度方案预演等功能。(3) 数据层: 承担多源异构数据融合与边缘计算任务。整合物理层传感数据、电网历史运行数据、气象数据等多类型数据,通过数据清洗、转换、融合等处理提升数据质量;借助边缘计算技术实现数据就近处理,降低传输延迟,保障实时调度需求。(4) 应用层: 搭载安全约束经济调度优化引擎,基于虚拟层模拟结果与数据层融合数据,采用先进优化算法生成调度方案。同时具备

方案评估、动态调整等功能,确保调度方案满足安全约束条件并实现经济最优<sup>[1]</sup>。

### 1.3 关键技术挑战

(1) 新能源出力的不确定性建模: 新能源出力受气象条件影响具有强随机性与波动性,如何精准量化风速、光照等不确定因素对出力的影响,构建高精度、强适应性的不确定性模型,是保障调度方案有效性的关键。(2) 安全约束的动态表达与量化: 电网运行状态动态变化导致安全约束条件实时调整,需建立动态适配的安全约束表达机制,实现对线路潮流、电压幅值、频率等约束条件的精准量化,避免调度决策违反安全边界。(3) 计算效率与精度的平衡: 多尺度孪生模型与复杂优化算法导致计算量激增,如何在保证调度决策精度的前提下,通过模型简化、算法优化等手段提升计算效率,满足实时调度的时间要求,是框架落地应用的核心挑战。

## 2 电力系统数字孪生体构建方法

### 2.1 多物理场耦合建模

(1) 电磁暂态模型: 聚焦发电机、变压器等核心电力设备,基于电磁感应定律与电路理论构建高精度电磁暂态模型。精准刻画设备内部电压、电流的瞬时变化规律,涵盖暂态过程中的电磁损耗、磁通耦合等关键特性,为分析设备电磁暂态响应、排查电磁兼容问题提供支撑,保障设备在复杂工况下的运行稳定性。(2) 机电暂态模型: 针对负荷、输电线路等元件,融合力学与电学原理构建机电暂态模型。重点描述负荷波动、线路故障等场景下的机电耦合动态过程,量化转速、功角等机械量与电压、功率等电气量的交互影响,助力精准模拟电网暂态稳定性,为调度决策中规避机电暂态风险提供模型基础<sup>[2]</sup>。(3) 经济性模型: 结合电力市场机制与“双碳”目标要求,构建涵盖发电成本与碳交易成本的经济性模型。其中发电成本包含燃料消耗、设备运维等直接成本,碳交易成本关联碳配额、碳价格波动等因素,通过量化经济指标实现孪生体对电网经济运行状态的精准映射,支撑经济调度优化决策。

### 2.2 动态数据驱动建模

(1) 基于SCADA/PMU的实时数据校正: 依托SCADA(数据采集与监控系统)与PMU(同步相量测量装置)的海量实时监测数据,建立数据校正机制。通过剔除异常数据、填补缺失数据、修正量测偏差等处理,消除数据传输与采集过程中的误差,确保输入孪生模型的数据真实可靠,实现模型与物理系统的动态同步。(2) 机器学习辅助的参数在线辨识: 引入机器学习算法提升模型参数辨识的实时性与精准度,以LSTM(长短期记忆网络)为例,可利用其时序数据处理优势,基于历史风电出力数据与气象数据,实现风电出力的精准预测;同时针对模型关键参数,通过在线学习算法实时更新参数值,适配电网运行状态的动态变化,提升孪生模型的适应性<sup>[3]</sup>。

### 2.3 孪生体轻量化设计

(1) 模型降阶方法: 针对全尺度孪生模型计算复杂度高、运算效率低的问题,采用Krylov子空间法等模型降阶技术。在保留

模型核心动态特性的前提下,通过投影变换降低模型维度,减少变量数量与计算量,实现模型复杂度与计算精度的平衡,提升孪生体的实时响应能力。(2) 分布式计算架构: 构建边缘-云端协同的分布式计算架构,将实时性要求高的计算任务(如实时数据处理、本地模型更新)部署在边缘节点,利用边缘计算低延迟、高可靠的优势快速响应;将大规模模型训练、全局优化等非实时任务交由云端处理,借助云端强大的算力支撑完成复杂计算,通过协同调度提升孪生体整体运行效率。

## 3 电力系统数字孪生安全约束经济调度优化方法

### 3.1 安全约束动态映射机制

(1) N-1安全准则的数字孪生表达: 基于电力系统数字孪生体对物理电网的精准映射能力,将N-1安全准则转化为可量化、可计算的虚拟约束条件。通过在孪生模型中遍历模拟单一元件(发电机、线路、变压器等)退出运行的场景,构建覆盖全电网关键元件的N-1故障虚拟场景库,实现安全准则从抽象要求到具体虚拟仿真场景的转化,为调度优化提供直观的安全校验依据。(2) 实时热稳定极限计算: 依托数字孪生体的实时状态估计结果,融合线路参数、环境温度、负荷分布等多源动态数据,建立动态热稳定极限计算模型。通过孪生体实时跟踪电网运行状态变化,动态修正线路热损耗计算参数,精准测算不同运行工况下线路的热稳定极限,避免因静态热稳定阈值导致的调度保守或安全风险<sup>[4]</sup>。(3) 电压稳定约束的动态调整: 利用数字孪生体对电网电压分布的实时仿真能力,构建电压稳定裕度动态评估模型。结合节点负荷变化、新能源出力波动等实时数据,动态计算各节点电压稳定裕度,基于裕度变化动态调整电压约束阈值。针对电压薄弱节点,提前预设约束边界,确保调度方案实施过程中电网电压始终处于安全稳定范围。

### 3.2 多目标优化模型

(1) 目标函数: 最小化发电成本+碳排放成本。其中发电成本涵盖火电企业燃料消耗成本、新能源发电运维成本及机组启停成本,通过精准核算不同电源的单位发电成本构建成本函数;碳排放成本结合碳交易市场价格、不同电源碳排放系数,将碳排放总量转化为经济成本纳入目标函数,实现经济效益与低碳目标的协同优化,契合“双碳”战略要求。(2) 约束条件: 一是功率平衡约束,确保全网发电功率与用电负荷及网损保持实时平衡,是调度优化的基础约束;二是线路潮流约束,基于数字孪生体映射的线路参数与热稳定极限,限制线路潮流不超过安全阈值;三是备用容量约束,预留充足的旋转备用与冷备用容量,应对负荷波动与新能源出力不确定性;四是爬坡速率约束,考虑火电机组等可控电源的出力调节速率限制,避免机组频繁大幅调整出力导致设备损耗与运行不稳定。

### 3.3 求解算法设计

(1) 改进模型预测控制(MPC)框架: 针对电网运行的动态时变特性,优化传统MPC的滚动优化窗口与预测步长设置。结合数字孪生体的实时仿真能力,在每个优化周期利用孪生体预测未来多时段电网运行状态,基于预测结果动态调整优化窗口长度,

提升算法对新能源波动与负荷变化的适应性, 确保调度方案的前瞻性与实时性。(2) 结合强化学习的自适应优化: 引入深度确定性策略梯度 (DDPG) 算法构建自适应优化机制, 将调度优化问题转化为马尔可夫决策过程。利用数字孪生体生成海量虚拟运行场景用于算法训练, 使智能体在训练过程中学习不同工况下的最优调度策略, 实现调度参数的自适应调整, 提升算法在复杂不确定场景下的优化性能。(3) 约束处理技巧: 针对多约束耦合导致的优化问题求解复杂度过高的问题, 采用松弛变量法对部分非刚性约束进行适度松弛, 降低求解难度的同时保证解的可行性; 对于刚性安全约束, 采用惩罚函数法将约束违反量转化为惩罚项纳入目标函数, 通过设置合理的惩罚系数, 迫使优化结果向满足约束的方向收敛, 保障调度方案的安全性与最优性。

#### 4 电力系统数字孪生调度的挑战与未来方向

##### 4.1 实施挑战

(1) 高精度孪生体建模成本: 构建覆盖全电网的高精度数字孪生体需投入大量资源, 包括高保真传感器部署、多物理场耦合模型开发及算力设备升级等。核心设备与技术研发成本高昂, 且模型校准、维护需持续投入人力物力, 导致中小企业难以承担, 制约了技术规模化推广。(2) 实时数据安全与隐私保护: 数字孪生调度依赖SCADA、PMU等系统的海量实时数据传输与共享, 数据涵盖电网运行核心参数、用户用电信息等敏感内容。传输过程中面临黑客攻击、数据泄露风险, 而现有加密技术难以兼顾实时性与安全性, 隐私保护法规的不完善也增加了数据管理难度。(3) 调度员对数字孪生的信任度: 传统调度依赖调度员经验判断, 数字孪生调度输出的优化方案具有较强技术性与抽象性。若缺乏直观的结果验证机制, 调度员易对模型可靠性产生质疑, 尤其在极端工况或故障场景下, 难以完全信任并采纳虚拟仿真生成的调度指令, 影响技术落地效果。

##### 4.2 未来研究方向

(1) 量子计算加速优化求解: 针对数字孪生调度中多目标优

化问题的高维度、强耦合特性, 引入量子计算技术突破传统算力瓶颈。利用量子叠加与纠缠特性提升复杂优化问题的求解效率, 缩短调度方案生成时间, 为实时动态调度提供更强算力支撑。(2) 数字孪生与区块链结合: 融合区块链去中心化、不可篡改特性与数字孪生精准映射能力, 构建去中心化电力交易调度平台。通过区块链实现交易信息透明可追溯, 依托数字孪生完成交易场景仿真与安全校验, 提升分布式电源参与市场交易的灵活性与安全性。(3) 面向新型电力系统的孪生体自进化方法: 针对新型电力系统高比例新能源、高比例电力电子设备的特性, 研发孪生体自进化技术。通过在线学习算法实时适配电网拓扑、运行工况变化, 实现模型参数自动更新、结构动态调整, 提升孪生体对新型电力系统的适应性与长效可用性。

#### 5 结束语

数字孪生技术为电力系统安全约束经济调度提供了全要素感知、多场景模拟与动态优化决策的创新路径, 有效破解了新能源不确定性建模、安全约束动态量化及实时计算效率等关键难题。未来, 随着量子计算、区块链与自进化孪生体等技术的深度融合, 该方法将进一步提升调度决策的智能化水平, 助力构建适应高比例新能源接入的新型电力系统, 推动能源转型与“双碳”目标的高效实现。

#### [参考文献]

- [1] 王志强, 李晓燕, 赵鹏程. 考虑碳排放成本的电力系统经济调度优化研究[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(08): 123-125.
- [2] 刘明辉, 孙雅琴, 陈宇轩. 基于碳排放成本约束的电力系统经济调度模型与策略[J]. 电网技术, 2022, 46(11): 421-422.
- [3] 王晓玲, 刘参参, 石伟光. 数字孪生技术在新型电力系统数字化建设中的应用分析[J]. 电力设备管理, 2025, (5): 112-114.
- [4] 高怡杰, 蔡德福, 俞耀文. 面向电力系统安全约束经济调度的数字孪生方法[J]. 电力自动化设备, 114-115.