

电力调度元宇宙架构及关键基础技术验证研究 (下): 应用场景规划、原型系统设计与验证

郭凌旭^{1,2}, 齐晓琳³, 刘金波⁴, 张凤彬³, 孙宏斌¹, 高圣源⁵, 王海龙⁶

(1. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京市 海淀区 100084;

2. 国网天津市电力公司, 天津市 河北区 300010;

3. 电力调度自动化技术研究与系统评价北京市重点实验室(中国电力科学研究院有限公司),
北京市 海淀区 100192;

4. 国家电力调度控制中心, 北京市 西城区 100031;

5. 北京用尚科技股份有限公司, 北京市 海淀区 100085;

6. 上海商汤智能科技有限公司, 上海市 徐汇区 200231)

Research on the Verification of Power Dispatch Metaverse Architecture and Key Basic Technologies (Part II): Application Scenario Planning, Design and Verify the Prototype System

GUO Lingxu^{1,2}, QI Xiaolin³, LIU Jinbo⁴, ZHANG Fengbin³, SUN Hongbin¹, GAO Shengyuan⁵, WANG Hailong⁶

(1. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China;

2. State Grid Tianjin Electric Power Company, Hebei District, Tianjin 300010, China;

3. Beijing Key Laboratory of Research and System Evaluation of Power Dispatching Automation Technology (China Electric Power Research Institute), Haidian District, Beijing 100192, China;

4. National Power Dispatching and Control Center, Xicheng District, Beijing 100031, China;

5. Beijing Yong Shang Power Soft Ltd., Haidian District, Beijing 100085, China;

6. Shanghai SenseTime Intelligent Technology Co., Ltd., Xuhui District, Shanghai 200231, China)

ABSTRACT: The metaverse is a collective virtual shared space constructed using various technologies, which can perform ultra-low cost trial and error verification on power systems and assist personnel and organizations in immersive communication beyond time and space. It can serve as a "test station" in the development path of new power systems. This article is based on the concept of a cyber-physical-social system and designs the early, middle, and later application scenarios of the power dispatch metaverse. The dispatcher training simulation scenario is selected as the initial verification scenario. A prototype system of the power dispatch metaverse has been designed and developed, and it includes a light three-dimensional engine for power dispatch, a virtual dispatch hall, a digital clone, and a virtual grid. It is piloted in provincial power grids to improve the operation and control technology of power system dispatch, providing a paradigm for

the promotion and application of the power dispatch metaverse in other scenarios in the future.

KEY WORDS: metaverse; cyber-physical-social system; digital twin; dispatcher training system; avatar

摘要: 电力调度元宇宙是一个应用多种技术构建的集体虚拟共享空间, 可对电力系统进行超低成本的试错验证, 并可超时空协助人员、组织进行沉浸式沟通, 可作为新型电力系统发展道路中的“试验站”。该文基于信息物理社会系统理念, 设计电力调度元宇宙的前期、中期及后期应用场景, 选取电力调度元宇宙调度培训仿真作为初期验证场景, 设计研发包含电力调度专用轻型三维引擎、虚拟调度大厅、数字分身及虚拟电网的电力调度元宇宙原型系统, 并在省级电网进行试点应用, 实现电力系统调度运行控制技术提升, 为后续电力调度元宇宙在其余场景中的应用推广提供范式。

关键词: 元宇宙; 信息物理社会系统; 数字孪生; 调度培训仿真; 数字分身

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2024.0853

0 引言

近年来, 对元宇宙概念、发展与应用的研究逐

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目(电力调度元宇宙架构及关键基础技术验证研究与应用(5108-202312052A-1-1-ZN))。

Project Supported by Science and Technology Project of SGCC (Research on the Verification of Power Dispatch Metaverse Architecture and Key Basic Technologies (5108-202312052A-1-1-ZN)).

渐成为学术研究中的一个热点。清华大学新媒沈阳团队在 2021—2022 年先后发布了 3 篇关于元宇宙发展的研究报告,分别对元宇宙进行了概念梳理、行业分析、发展预测。各大互联网公司在元宇宙虚拟引擎、虚拟数字人等方面开展了大量研究,如英伟达公司 Omniverse 平台、Meta 公司 Oculus 平台、百度希壤平台等。

在军事领域,军事元宇宙将战场空间拓展到元宇宙,其“连接性+高保真+沉浸感”的特征可用于满足改进训练、改进作战、改进信息能力等多种需求^[1]。在军事元宇宙中目前有两种较为成熟的应用场景^[2-4]:一是虚拟作战推演;二是虚拟作战指挥。类比于军事元宇宙,电力调度的主要元素是物理电网、调度自动化系统和调度运行人员,重在构建多级调度合作的数字化协同指挥空间,因此军事元宇宙的发展路径可为电力调度与元宇宙的结合及场景规划提供参考。

电力属于资金技术密集行业,试错成本极高,需不断寻找低成本试探路径,且电力行业人员机构分工复杂,协作管理成本高,需要可信的“面对面”合作环境。元宇宙中的电力系统是建设数字化、信息化、智能化新型电力系统的有效验证手段,目前已在电网状态可视化、电力培训、设备远程智能巡检、远程故障诊断、检修与辅助决策等方面^[5-8]进行了探索。

本文的前篇系列文章首次将元宇宙与电力系统调度控制业务融合,提出电力调度元宇宙(power dispatch metaverse, PDMV)概念。本文在前序研究基础上,基于信息物理社会系统理念,设计 PDMV 的前期、中期及后期应用场景,选取 PDMV 调度培训仿真作为初期验证场景,首次基于省级电网实际数据,设计研发包含电力调度专用轻型三维引擎、虚拟调度大厅、数字分身及电网沙盘四大功能模块的 PDMV 原型系统,实现电力系统调度运行控制技术提升,为后续 PDMV 在其余场景中的应用推广提供范式。

1 电力调度元宇宙应用场景设计理念

基于面向复杂系统设计原理的 PDMV 理论框架,以经典控制论、自组织理论及复杂系统论为基础理论,面向电网调控运行具体应用场景,以信息物理社会系统(cyber-physical-social-system, CPSS)为实践方法论,为 PDMV 应用场景设计提供指导。CPSS 旨在描述复杂网络系统中信息网络、物理系统和社会因素的特征及其交互影响,以实现对该类

系统的建模、推理和决策,与 PDMV 这个复杂系统的关键要素及运营模式相契合。

1) 信息-物理融合。

目前业界对信息物理系统的研究主要集中在融合建模^[9-15]及仿真分析^[16-21]两方面。国网经济技术研究院有限公司等构建了电力信息物理系统实时仿真平台^[16],浙江大学构建了新型有源配电网信息物理系统混合仿真平台^[17],上海电力大学构建了电网信息物理系统建模与仿真验证平台^[18],华盛顿州立大学等构建了实时在环测试平台^[19],应用于电力通信网络攻击、配网终端即插即用、电力物联网运行控制及安全防护等场景。

在 PDMV 的建设及发展过程中,初期重在构建与物理电网并行的平行电网,在信息系统建设层面依托现有智能电网调度技术支持系统、新一代调度技术支持系统等现有调度自动化系统,汇集电力系统海量模型数据,并集合电力调度元宇宙中智能生成的各类预测和模拟数据作为数据底座及平台底座。在发展过程中结合信息物理融合理念,逐步在 PDMV 中搭建一比一的调度自动化系统,元宇宙世界中的虚拟调度员可根据实时监控、在线安全分析、优化调度等信息做出调度指令,在数字指挥环境中完整模拟从外部环境变化、调度自动化系统信息采集分析控制、调度员下令指挥到电网运行变化的全过程,从而实现 PDMV 中的信息物理融合。

2) 信息-物理-社会融合。

目前在影响电力系统调度控制的社会因素研究主要包含两个方面:一方面是人因可靠性,如调度运行人员的工作经验、心理状态对调度操作的影响程度;另一方面是涵盖电力企业生产经营活动的全过程运转可靠性,内部包含电网规划、工程建设、调度运行、设备检修、市场营销、人财物管理等因素,外部包含如极端天气、能源价格波动、社会发展等因素。目前已在现货电力市场报价行为模拟^[22-23]、检修人员技术水平与设备故障率关联关系计算^[24]、城市建筑与配电网高韧性协调运行^[25]、电动汽车充电优化调度^[26]等场景中的应用。

在 PDMV 的应用场景规划中,基于 CPSS 中融合社会因素理念,初期聚焦在调度运行人员的行为建模及仿真模拟方面,预期构建数字分身及虚拟数字人两类角色。数字分身是调度运行人员通过穿戴设备进入到 PDMV 中的角色,其行为模拟本质上还是真实调度员的行为映射;虚拟数字人具备自主学习和进化能力,是 PDMV 中的纯虚拟角色(类似电子游戏中的非游戏玩家(non-player-character,

NPC)), 通过对数字分身历史业务行为的学习进化, 使其行为更加贴近真实调度行为。PDMV 中数字分身与虚拟数字人并存, 例如在 PDMV 中模拟电力交易报价出清场景, 某些市场主体可作为数字分身进入, 其余市场主体应是考虑了当时电网运行特性及各报价者取向的虚拟数字人, 共同完成市场出清模拟。在 PDMV 发展的中后期, 逐步将电力企业生产经营活动全过程因素进行建模及仿真模拟, 同时, 在应用需求驱动下, 扩展 PDMV 的虚拟建模维度及智能分析深度。

2 电力调度元宇宙应用场景规划

面对新型电力系统在电源构成、电网形态、负

荷特性、技术基础及运行特性 5 个领域的转变^[27], 需从“系统”的角度思考现代电力系统的重构问题。PDMV 可作为新型电力系统发展道路中的“试验站”, 对未来电力生产结构转变及运行特性转变进行超前研判推演。PDMV 的建设应与新一代电网调度技术支持系统的建设有机结合, 因此本文在新型电力系统发展需求基础上, 参照主流调度技术支持系统体系架构及业务应用规划设计 PDMV 应用场景, 结合数字孪生电网演进的三阶段^[28-29]及各场景的业务需求和实施难度, 并考虑每个阶段 PDMV 各利益主体之间信息交互模式变迁, 将 PDMV 应用场景划分为初期、中期及后期, 整体规划如图 1 所示。

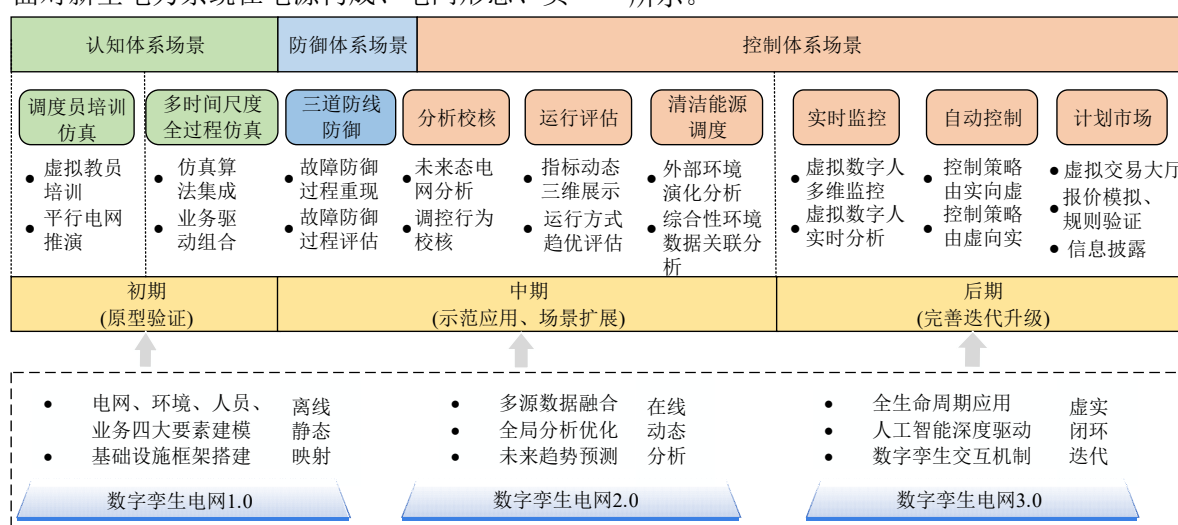


图 1 PDMV 应用场景规划

Fig. 1 Application scenario planning of PDMV

以数字孪生为基础的 PDMV 同样具备“自治、同步、互动、共生”4 个特点。初期, 利用三维仿真和沉浸式交互技术, 结合调度培训场景, 研发验证原型系统; 利用 PDMV “自治”特性实现离线仿真, 侧重电力系统沉浸式感知学习与培训。中期, 以多维数据关联分析和平行电网技术为特点, 适用于故障防御、分析校核、计划预测和运行评估; 利用 PDMV “同步”特性准确反映物理规律, 实现在线多时间尺度动态分析; 侧重电力系统超前分析与试错验证。后期, PDMV 以智能决策和实时交互为特点, 适用于实时监控、自动控制和电力市场业务; 利用 PDMV “互动、共生”特性增进对物理实体的认知与控制; 实现 PDMV 与物理世界的虚实闭环迭代控制, 实现“虚实映射”。

经过 3 个发展阶段, PDMV 功能逐步涵盖新型电力系统调度体系全过程, 主要包括认知、防御、控制三大场景。

2.1 重构认知体系场景

未来电力系统物理形态和运行特性将发生显

著变化, 复杂性、非线性及不确定性增加, 电力系统认知面临全新挑战。仿真是认知电力系统特性的关键技术手段, 新型电力系统仿真体系是在传统电力系统仿真体系基础上的迭代升级, 适应新型电力系统的深刻变化与仿真需求, 具有全维度、全场景、全要素、全过程的特征^[30-31]。

1) 调度员培训仿真。

调度员培训仿真^[32]主要面向调度员技能水平提升, 为电网调控运行过程仿真模拟、运行推演业务提供技术支撑。在培训方面, 在 PDMV 中, 应用大模型 Agent 技术, 构建具有全局视角及丰富调度运行经验的虚拟教员, 对不同水平不同岗位的调度运行人员进行“因材施教”; 在推演方面, 考虑外部环境变化等社会复杂性要素, 构建不确定性推演场景, 开展平行电网多分支推演, 仿真未来态电网演变过程。以“沉浸式”人机交互模式, 将新型电力系统复杂机理特性以更加形象、直观形式展现, 降低调度人员对电网特性把控的难度, 提高从业人

员的培训效率。

2) 多时间尺度全过程仿真。

电力系统多时间尺度全过程仿真包括支撑电网运行方式安排、静态安全校核等业务的稳态潮流计算,支撑大电网稳定特性研究、规划方案与运行控制策略制定等业务的电力系统时域仿真(包括机电暂态仿真、机电-电磁暂态混合仿真和全电磁暂态仿真)及支撑电网规划方案、电力电量平衡分析、灵活调节能力规划等业务的生产模拟仿真^[33-35]。在PDMV中集成多时间尺度的各类仿真算法,能够根据业务场景为之调用相匹配的仿真算法及仿真环境,从而打破各业务部门协同分析计算壁垒。多时间尺度全过程仿真需要超强的算力与通信资源支持,PDMV为传统割裂的ns、 μ s、s、min等不同尺度电气特性分析计算,提供模型规范、24h在线永续验证环境,认知分析结果更全面客观。

2.2 重构防御体系场景

新型电力系统运行状态不确定性增加,脆弱性元件增多,故障形态、路径、特征复杂,对电网防御体系及防御手段要求提高。

在PDMV中,对电力系统三道防线的二次装置进行精准详细建模,能够将电网运行、故障发展过程及故障防御过程进行时序联合推演。当电网发生故障时,根据电网中各电气量的变化,判别继电保护装置是否满足定值条件来驱动继电保护动作,对非电气量的继电保护采用逻辑法模拟;在继电保护动作后,若仍满足安自装置动作条件,则根据安自装置模型及定制触发相应动作,如直流调制、切机、切负荷等;若此时仍存在失步振荡、频率异常等情况,将进一步触发主动解列、低频低压减载等策略。最后对整个故障发展防御过程进行电网运行安全性评估,研究故障处置过程的提升方案。PDMV将综合电气量、骤变气象、地形环境、数字分身行为等,通过人工智能技术判别故障或失稳类型、溯源,推测成因,评估风险,对重构后的电网调整给出建议。

2.3 重构控制体系场景

新型电力系统背景下电网控制基础发生重大变化,电力电子类电源不具备传统发电机的控制特性;控制规模大幅增长,从以源为主扩展到源网荷储各环节,系统总体分析控制难度增大。

1) 分析校核。

分析校核类应用为电网运行分析及运行态势快速准确在线评估提供支撑。在PDMV中,可利用数字指挥空间为电网分析校核赋能。一是在数字空间中构建未来态电网运行场景,分析未来电网运行

态势及薄弱点,实现对电网未来态势具象化、三维化、时序化表达。二是对PDMV中数字分身或虚拟数字人的调控行为进行校核,在实施调控决策前校验虚拟调控策略对物理电网的影响程度,验证调控行为合理性。

2) 运行评估。

运行评估类应用对电网历史运行情况进行客观量化评价,对典型电网调度业务进行深度挖掘与评估,指导电网运行持续优化。在PDMV中,接入实时大电网多维度运行评估指标计算结果,利用虚拟调度大厅的可视化功能,实现对电网安全稳定类、平衡调节类、新能源消纳类及电网概况等指标信息的动态三维展示,同时可根据数字分身岗位及专业不同,为其自动推送相关运行指标信息,实现“千人千面”;同时针对平行电网多次推演过程及结果,能够实现运行方式趋优评估,筛选出最优运行方式,为调度运行辅助决策提供支撑。

3) 清洁能源调度。

清洁能源调度类应用根据电力安全保供与清洁能源消纳需求,编制水电、新能源、抽蓄、新型储能调度方案。在PDMV中,集成气象、灾害、水情、一二次能源等多类型内外部数据,以可视化的方式表达抽象事物的演化过程。一是可全过程展示外部环境演化过程及对负荷用电和新能源发电的影响,并进行趋势分析;二是调度员可以在一个综合性环境中进行数据关联分析,快速地了解各个方面的情况,并做出相应的调整,高效应对强随机性、波动性的新能源大规模并网以及电动汽车、分布式电源等交互式设备大量接入后的电网调度复杂度提升,降低信息碎片化带来的误差。

4) 实时监控。

实时监控类应用实现一次设备、二次设备、负荷资源、一次能源、气象环境等各类对象的一体化全景监视和综合告警。PDMV中,实时监控的监视模式发生转变,不再依赖传统的监控屏幕和报表,具有高度模拟性和真实感、虚拟数字人在线多维监控、海量数据快速处理分析等功能。虚拟数字人可替代调度员的实际监盘过程,在线多维监视电力系统,观察各个设备的位置和状态,能够更好地理解复杂电力系统状态并给出实时综合智能告警结果。

5) 自动控制。

自动控制类应用实现对电网频率、电压和潮流的优化自动控制,增强电网实时调节能力。在PDMV中,通过将控制策略进行“虚实映射”,即将实际物理系统的行为映射到虚拟环境中,在虚拟

环境中测试和验证控制策略，以确保它们在实际系统中的有效性和性能；当控制指令在元宇宙中验证通过并执行时，也可同步反馈至实际物理系统中执行。这种映射确保了控制策略在实际系统中的性能、有效性和可行性，可以帮助降低实际系统的试错成本和运行风险，提高控制策略的质量和效率。

6) 计划市场。

计划市场类应用实现全网电力电量统筹平衡、检修安排统筹优化。在虚拟调度大厅之外，针对计划市场业务，在 PDMV 中可构建由多子系统功能组成的虚拟交易大厅。一是支持各类电厂等海量市场主体在虚拟交易大厅中进行报价行为模拟，通过市场出清计算与推演，验证报价合理性。二是针对未来新型电力系统中的市场新规则进行推演验证，利用 PDMV 多场景同步推演、“快进”模拟，高效验证规则的合理性，为交易机构、电力监管机构降低试错成本。三是充分发挥 PDMV 的数据汇集展示能力，利用各种三维可视化手段，对海量市场信息进行披露，整体上实现交易主体在虚拟交易大厅中完成预报价、正式报价、出清、结算及信息披露全过程。

PDMV 中的多方利益主体包括调度员、发电厂、新能源运营商、虚拟电厂运营商、负荷聚合商等，不同利益主体独立训练代表各自运行需求及运行模式的数字分身，各方数字分身在 PDMV 中进行不间断的交互博弈。PDMV 中构建运行生态保障机制，通过法律法规、市场规则及数据资产管理运营机制，各方主体在 PDMV 制度规范的约束下进行各方利益博弈均衡。

3 电力调度元宇宙调度培训仿真场景设计

调度培训仿真(dispatcher training system, DTS)

场景具有非在线、非实时、可任意构造场景、可任意试错的特点，且包含物理电网(物理)、调度自动化系统(信息)、调度运行人员(社会)三大要素，因此选择此场景作为 PDMV 首个验证场景。此场景设计的整体架构如图 2 所示，按照“理论指导-技术研究-功能研发-场景实现”的思路开展验证。

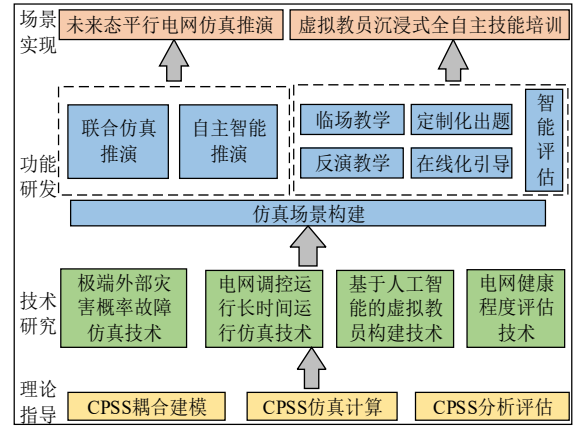


图 2 PDMV 调度培训仿真场景整体架构

Fig. 2 Overall architecture of DTS scenario in PDMV

3.1 场景设计

1) 仿真推演场景。

调度仿真推演场景设计如图 3 所示。考虑社会复杂性要素对信息物理系统的影响，研究 CPSS 融合背景下电网状态的动态演变。构建考虑外部环境的长时间尺度、不确定性推演场景，初级阶段支撑包含数字分身(参与推演的调度员)及虚拟数字人(其他参演角色)在内的联合反事故演习场景；高级阶段支撑平行电网自主多分支推演及最优方案选择，自动化、智能化推演未来态电网运行分支及最优风险预控策略。

2) 技能培训场景。

调度技能培训场景设计如图 4 所示。考虑以人为代表的社会复杂性要素对信息物理系统的影响，

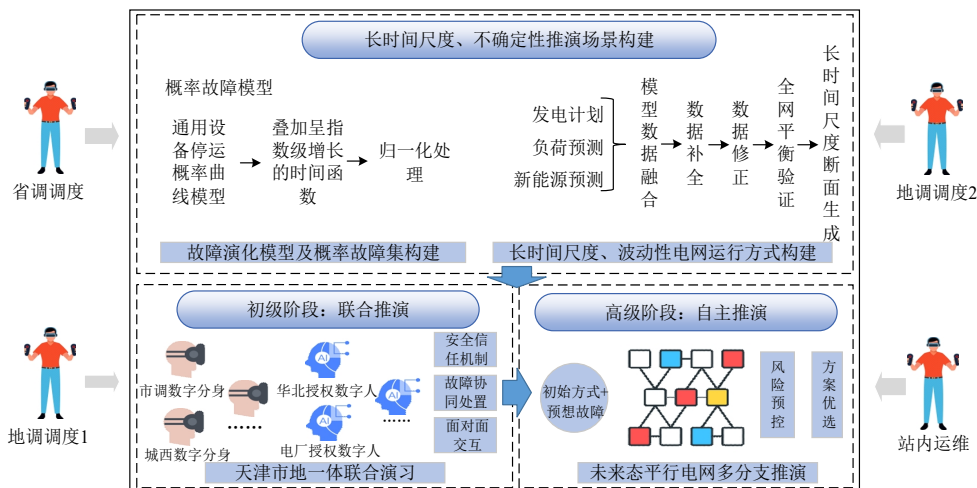


图 3 PDMV 仿真推演场景

Fig. 3 Simulation and deduction scenarios in PDMV

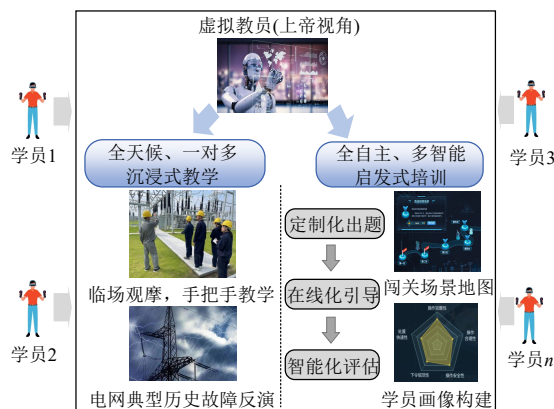


图4 PDMV 技能培训场景

Fig. 4 Skills training scenario in PDMV

研究 CPSS 融合背景下虚拟教员的动态行为, 构建具备丰富调度经验知识的虚拟教员, 以全局视角在 PDMV 中开展教学培训。虚拟教员能够全天候、一对多开展沉浸式教学, 突破调度大厅与实际电网及设备的时空限制, 提升教学临场感与沉浸感; 同时能够开展全自主、多智能的启发式培训, 实现“题库构建-在线引导-智能评估”全流程培训, 在元宇宙世界中的培训学时及培训成绩可以作为岗级晋升的指导参考, 改变真人教员线下教学模式, 提升培训效率。

3.2 功能设计

1) 仿真场景构建功能。

国际电力研究机构普遍认为气象原因是未来影响电网运行的三大关键因素之一。因此在 PDMV 的调度推演场景中, 重点在构建极端外部天气场景。此场景构建包含两方面: 一是结合台风、暴雨等极端外部天气演化路径构建电网概率故障模型, 从而形成长时间尺度下的电网概率故障集。二是考虑外部环境变化对新能源出力的影响, 构建波动性电网运行方式, 形成长时间尺度电网推演断面。整体上从原有的单时间尺度运行断面、固定预想故障的“脚本式”推演模式改变为长时间尺度运行断面、概率故障的“无脚本”推演模式。

2) 联合仿真推演功能。

各级调度人员以数字分身形式接入 PDMV 虚拟调度大厅, 按照权限分配进入相应仿真场景, 其他故障处置过程中涉及到的角色利用虚拟数字人形式进行模拟(如上级调度机构等); 仿真过程由系统自动推进, 模拟电网运行状态变化及调控指令行为对电网运行的影响, 结合历史运行数据分析, 通过信息熵的形式评估电网及各设备历史运行健康情况。

3) 自主智能推演功能。

依据给定的电网初始运行方式、预想故障及电网运行边界条件, 由 PDMV 智能计算层自主开展平行电网多分支推演, 既推演未来电网可能的多种运行趋势, 又推演各类运行分支下电网的故障处置方案, 构建电网运行评估体系, 得到最优运行方案, 智能形成电网预案, 为未来态电网风险预控提供辅助决策。

4) 在线引导教学功能。

在 PDMV 的调度培训场景中, 具有丰富调度经验的虚拟教员十分重要, 它将代替真人教员(一般为调度值长等), 为不同岗级调度员制定教学方案并全天候在线教学指导, 提升调度技能培训效率。

虚拟教员主要具备以下功能:

①临场教学。带领学员进入三维电网及变电站观摩, 讲解电网运行及设备特性, 指导设备操作, 提升教学临场感和学员对电网的整体认知。

②反演教学。分析电网历史故障, 形成反演教案, 在线讲解故障演变, 总结电网薄弱点及启示。

③定制化出题。根据学员成绩构建画像, 自动匹配难度相符的培训题目, 实现因材施教。

④在线化引导。自主触发电网故障, 根据学员表现进行在线引导教学, 如调整推演难度或提示故障处置点。

⑤智能化评估。评估学员整体表现, 指出不足, 更新学员画像, 为职级晋升提供参考。

3.3 关键技术

1) 极端外部天气概率故障仿真技术。

台风、暴雨等极端外部天气在预防、形成、侵袭、削弱及恢复的全过程中, 会给电力系统带来持续性随机性的影响: 一是影响风电、光伏等新能源出力, 其剧烈波动可能会造成电网稳定问题, 同时新能源大幅波动可能会造成严重电力平衡问题。二是造成设备元件故障, 且单个或多个设备故障而导致的潮流转移可能会进一步引发群发性及连锁故障^[36-37]。因此需建立各类外部环境影响域模型及概率故障模型, 在 PDMV 仿真推演过程中, 根据预设外部环境情况, 触发随机故障, 为调度运行人员构建一个真实且不可预知的电网运行场景。

2) 电网调控运行长时间运行仿真技术。

传统的电网调控运行模拟仿真只针对某一固定时刻的断面进行计算, 并在此基础上进行事故模拟及恢复, 不支持多时间尺度的仿真推演。PDMV 中的仿真是分钟级、小时级及天级的长时间尺度推演, 既跟踪发电计划及负荷预测曲线实时仿真电网

运行状态,同时又与数字分身或虚拟数字人交互,接收指令、执行指令并展示执行结果和新的电网运行状态。在此仿真过程中会存在电网计划预测数据与指令事件之间的衔接继承问题,通过多时态数据整合技术、多时态仿真数据存储技术及多时态仿真过程动态播放技术,实现电网长过程仿真运行状态的播放、重演、快进、回退、操作,并在时序仿真过程中进行电网事故设置与恢复操作模拟。

3) 电网健康程度评估技术。

熵理论广泛应用于系统不确定性和稳定性描述中。目前信息熵在电力系统中应用涉及保护与控制、调度与运行、规划与评估等多种应用场景^[38],研究数量较多且应用相对广泛的两种熵是潮流负载熵^[39]与网络拓扑熵^[40]。PDMV 中的仿真推演涵盖要素多、推演时间长,因此元宇宙电网的运行状态及健康程度评估可借助信息熵理论实现。元宇宙电网的健康程度评估不仅仅针对实时运行状态,而是对历史运行状态的整体评估。目前业界所提出的潮流熵、拓扑熵、越限熵^[41]等概念均针对整个电网,是系统级的运算指标,元宇宙电网中从各个设备的历史运行状态出发,计算单个设备的历史运行健康程度,式(1)为母线历史电压熵计算公式。若某条母线的当前电压值正常,但历史电压熵值偏大,说明此处为电网运行薄弱点,应着重引起调度运行人员注意。

$$H_i = -\sum_{k=1}^n \frac{l(k)}{M} \ln \frac{l(k)}{M} \quad (1)$$

式中: H_i 为母线 i 的历史电压熵,给定 n 个连续区间 $[0, u_0), [u_0, 2u_0), \dots, [(n-1)u_0, nu_0)$, u_0 为自定义的电压取值拆分颗粒度; $l(k)$ 为母线电压落在第 k 个区间的数量; M 为历史数据总量; H_i 值越大,表明此母线的电压分布不均匀,波动较大。

4) 基于人工智能的虚拟教员构建技术。

为了使虚拟教员具备丰富调度经验,需利用人工智能技术训练虚拟教员,结合人工智能技术路线^[42-43],虚拟教员的训练有以下 4 种方式:一是利用人工智能符号范式中的知识图谱、决策树等技术,将调控知识转化为图谱形式。二是利用人工智能连接范式中的机器学习、深度神经网络等技术,将调控知识转化为神经网络。三是利用人工智能行为范式中的强化学习等技术,通过仿真闭环反馈训练具备调控知识的智能体。四是利用新兴起的大模型技术,构建电力调度通用大模型,具备语义理解、知识推理、问答交互等功能^[44-46]。不论运用哪种技术路线,虚拟教员都是一个不断迭代更新的过程,

通过在数字空间中完整保存数字分身的业务行为记录(如调度员下达调度令的行为习惯),使得人类工作习惯和经验得以沉淀和优化,促进虚拟调度员行为更符合真实调度员的习惯。

4 电力调度元宇宙原型系统设计

4.1 电力调度元宇宙原型系统呈现形式设计

PDMV 原型系统以电力调度专用轻型三维引擎为支撑,以虚拟调度大厅、数字分身及电网沙盘为具体呈现形式。

1) 电力调度专用轻型三维引擎。

电力调度专用轻型三维引擎示意图如图 5 所示。在空间地理上叠加电网、厂站、设备、新能源、运行、气象环境等能源互联网要素,基于三维可视化引擎技术构建地理环境、电网模型、运行信息三层电网视图架构,分层分级展示特高压大电网到低压配电网一体化模型,形成“全调度要素电网一张图”。在地理环境层,通过数字高程模型实现对地面地形的三维数字化模拟,突出地形地貌、铁路公路、山川河流等地理因素,集成天气预报、气温、降水、风、雷电、覆冰、山火、台风等多项外部环境数据;在电网模型层,突出电网元素,基于电网对象实体与多态关联关系的知识图谱实现厂站及设备模型画像技术,利用三维激光扫描技术,对变电站整体进行全方位扫描,快速获取变电站整体点云模型,通过 3DMax 建模实现变电站 1:1 高精度还原;在运行信息层,集成电网拓扑、潮流、电压、重过载、检修、故障、预警等实时运行数据,对电网计算模型进行自动生成立体网架,支持多级调度人员在虚拟空间中信息理解与协作,实现多层多维度数据关联展示分析,构建电网“播放器”。

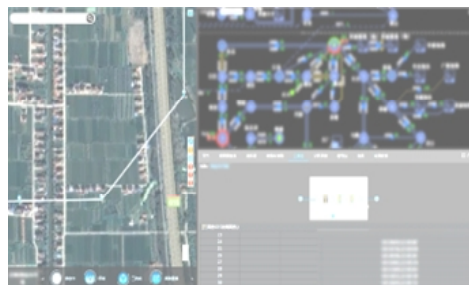


图 5 电力调度专用轻型三维引擎

Fig. 5 Special lightweight 3D engine for power dispatching

2) 虚拟调度大厅。

虚拟调度大厅如图 6 所示,包括调度展示大屏、调度员工作岛及虚拟会议室。大屏展示电网数字沙盘、电网运行指标及相应应用页面。调度员工作岛模拟日常调度员在调度台前的行为,如数字分身可



图6 虚拟调度大厅

Fig. 6 Virtual dispatching hall

进行坐下、发起会议、电话沟通、调取资料等操作。虚拟会议室用于模拟调度员分析电网故障、工作沟通等场景,提供音视频能力和声音隔离以供沟通。通过构建虚拟调度大厅,打破多级调度机构及现场工程运维的边界感,提升远程协作及信息共享能力。

3) 数字分身。

按照调度运行人员的形象进行数字分身形象塑造,具有捏脸、完整人体、肢体动作等功能,数字分身能够操作空间场景,如投屏、发起音视频聊天。根据调度机构及调度运行人员岗位,对数字分身在 PDMV 中的操作行为进行权限管控。

4) 电网沙盘。

在 PDMV 中构建电网仿真环境,依据电力调度专用轻型三维引擎、虚拟调度大厅、数字分身的调用规则及交互规范,在仿真推演过程中根据可视化需求调用相应服务接口,沉浸式动态展示电网演变过程。

4.2 电力调度元宇宙原型系统仿真推演设计

PDMV 是一个集成了物理电网、调度自动化系统及调控运行人员于一体的数字孪生环境,其最大的优势是能够开展与物理世界同步且不间断的平行仿真推演,并能模拟调度运行人员行为、信息系统故障异常、外部环境变化等复杂巨系统的大量随机因素对物理电网运行的影响。因此 PDMV 原型系统仿真推演应包含短时间尺度内外部环境、人为操作等随机因素对电网运行影响,长时间尺度内电网结构变化、发用电水平变化及信息系统升级等因素对电网运行的影响以及 PDMV 虚实交互模拟。参考基于自组织临界理论的 OPA 模型^[47]内外两层循环方法,提出 PDMV 仿真推演改进 OPA 模型,其流程图如图 7 所示。其中,内循环为第 k 天内仿真推演过程,中循环为日前仿真推演过程,外循环为支撑 $k_{\max}$ (其中, k 为当前仿真天数, $k_{\max}$ 为仿真最大天数)天完成推演所需的模型、数据、知识以及与元宇宙闭环的物理世界。

5 电力调度元宇宙原型系统验证

5.1 整体架构验证

结合系列论文^[48]中提出的 PDMV 体系框架、技术架构及演进路径,PDMV 在工程实施阶段不是

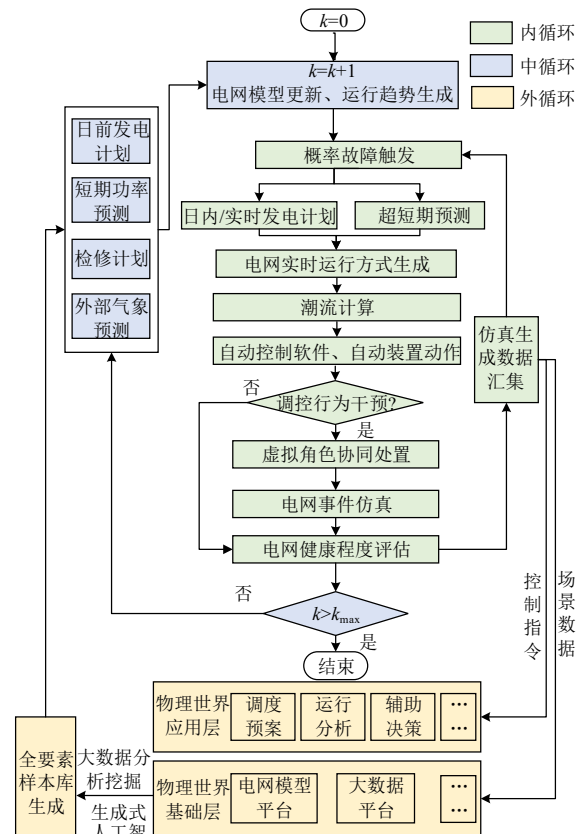


图7 PDMV 仿真推演改进 OPA 模型流程图

Fig. 7 Improve OPA model flowchart of PDMV simulation

一蹴而就的,需与现实系统伴生共存。因此 PDMV 原型系统的架构验证流程如图 8 所示。

初期 PDMV 中暂不构建虚拟调度自动化系统镜像。基础设施物理层及现实数据生成层依赖现有调度自动化系统的硬件资源及模型数据,建立调度自动化系统模型数据与 PDMV 数据层的手动或定时同步更新机制,实现算力和数据共享;智能计算层实现数据融合分析及平行电网推演评估;虚实交互处理层构建电力调度专用轻型三维引擎,实现物理实体、抽象实体(如潮流)和抽象概念(如电网振荡)的立体化表达;人机交互层实现调度运行人员以数字分身方式进行沉浸式人机交互;利用 PDMV 生态保障机制来对用户进行权限管控,对数据进行加密管理;利用元宇宙区块链联盟进行数字分身及虚拟数字人的操作存储管理。

中后期通过搭建虚拟调度自动化系统,实时同步现实运行数据。智能计算层实现基于 AI 的虚拟数字人调控行为建模及训练;在 PDMV 中推演后将数字分身、虚拟数字人的调控指令及决策行为在 PDMV 中开展镜像仿真推演校核,并返回到现实世界的调度自动化系统中进行分析、控制与交易,与物理电网形成闭环,从而实现虚实世界迭代交互。

5.2 技术业务验证

PDMV 原型系统已在某省级调控中心应用,通

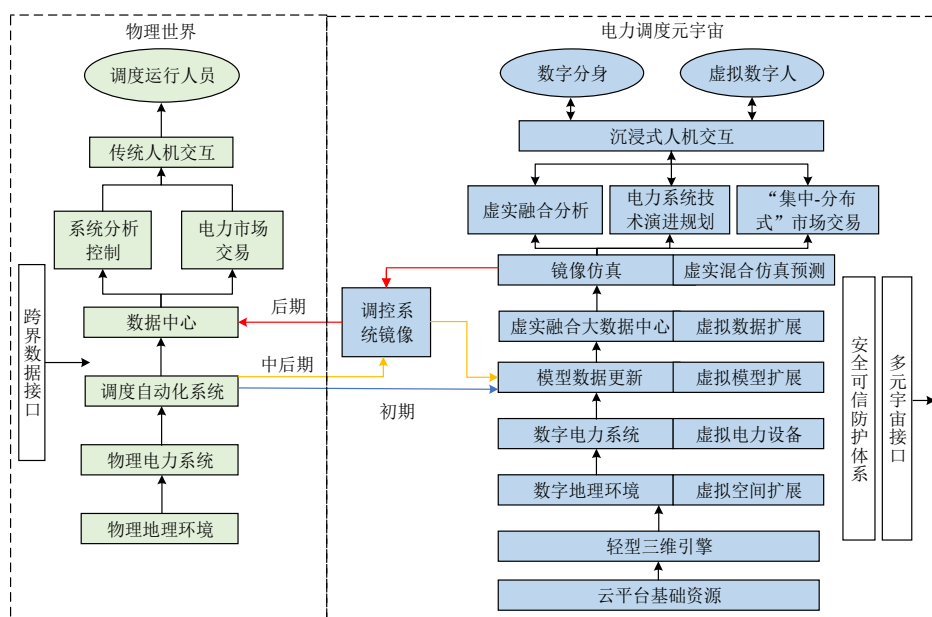


图8 PDMV原型系统架构验证流程图

Fig. 8 PDMV prototype system architecture verification

过构建省地一体联合反事故演习场景，验证 PDMV 原型系统可行性及实用性。PDMV 中的省地一体联合反事故演习场景的数据交互流程如图 9 所示。

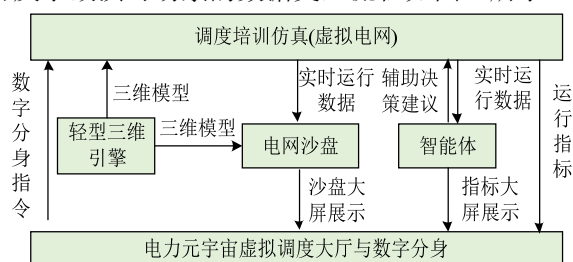


图9 PDMV原型系统数据交互流程

Fig. 9 PDMV prototype system data interaction process

推演流程为：

- 1) 省地两级调度员佩戴 VR 眼镜，以数字分身形象进入虚拟调度大厅。
- 2) 虚拟调度大厅中有 3 块调度展示大屏，分别展示电网沙盘大屏、电网运行指标大屏及调度培训仿真主界面。
- 3) 调度培训仿真按所构建的极端天气故障案例，按时序触发电网群发性故障并推进时序变化的电网运行方式。
- 4) 电网沙盘大屏展示三维气象信息、三维变电站设备故障情况、故障区域三维 GIS 信息等多元信息，并对故障告警信息给予提示。
- 5) 电网运行指标大屏展示重点设备的实时运行信息、重载越限等统计信息及潮流熵、电压熵等电网健康状况指标。
- 6) 省调、地调调度人员数字分身在虚拟调度大厅通过语音、视频等方式进行下令、回令等指挥，指令同时通过元宇宙区块链进行存储。
- 7) 现场运维操作人员数字分身在虚拟三维变

电站中进行开关分合闸等操作。

8) 整个仿真推演过程中，通过 PDMV 生态保障机制控制用户权限，虚拟调度大厅根据数字分身角色权限自动组织并重点突出其所属调度机构范围内的电网运行情况。

9) 演习结束后，整个推演过程数据存储到 PDMV 的虚实数据中心，供后续虚拟数字人进行行为训练；数字分身退出 PDMV 环境，虚拟调度大厅进行初始化恢复。

6 展望

本文所构建的 PDMV 原型系统及其在调度培训仿真场景中的应用，可作为元宇宙与电力调度业务相结合的初步尝试。

后续在关键技术攻关层面：1) 在数据生成层突破非结构化数据汇集融合及边缘计算等技术；2) 在人机交互层突破 AR 头显、调度大屏、手机等设备间无缝协同技术；3) 在智能计算层突破挖掘新型电力系统运行机理、优化监视调整策略、推演虚拟融合的电力系统运行短-中-长周期运行过程等技术；4) 在虚拟生成层突破虚拟视觉模型的快速生成技术。

在应用场景层面，可继续开展 PDMV 在其他场景中的应用验证，从而迭代优化 PDMV 功能。作为整合多种新技术而产生的新型虚实相融的互联网应用和社会形态，助力新型电力系统建设。

致谢

本文作者非常感谢国网电力科学研究院有限公司对 PDMV 应用场景规划及原型系统设计提出的宝贵意见及指导！

参考文献

- [1] 赵坦, 吴琳, 陶九阳, 等. 元宇宙概念及其军事运用[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(7): 1405-1420.
ZHAO Tan, WU Lin, TAO Jiuyang, et al. Metaverse concept and its military application[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(7): 1405-1420(in Chinese).
- [2] 张昭, 郭玉杰, 赵晓宁, 等. 军事元宇宙刍议与展望[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(7): 1421-1437.
ZHANG Zhao, GUO Yujie, ZHAO Xiaoning, et al. Military metaverse: key technologies, potential applications and future directions[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(7): 1421-1437(in Chinese).
- [3] 李伟强, 邓红艳, 王修齐. 军事元宇宙的应用与发展方向研究[J]. 国防科技, 2023, 44(1): 25-33.
LI Weiqiang, DENG Hongyan, WANG Xiuqi. Research on the application and development direction of military metaverse[J]. National Defense Technology, 2023, 44(1): 25-33(in Chinese).
- [4] 宋卫东, 马宁, 孟庆良, 等. 元宇宙军事仿真应用探索[J]. 制导与引信, 2022, 43(4): 30-34, 56.
SONG Weidong, MA Ning, MENG Qingliang, et al. Exploration of metaverse military simulation application[J]. Guidance & Fuze, 2022, 43(4): 30-34, 56(in Chinese).
- [5] 周博文, 奚超, 李广地, 等. 元宇宙在电力系统中的应用[J]. 发电技术, 2022, 43(1): 1-9.
ZHOU Bowen, XI Chao, LI Guangdi, et al. Metaverse application in power systems[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(1): 1-9(in Chinese).
- [6] 刘航, 陈肖龙, 李卓晖, 等. 基于 CAVE 虚拟现实技术的电网线路灾情勘察训练系统设计与实现[J]. 南方能源建设, 2021, 8(S1): 10-19.
LIU Hang, CHEN Xiaolong, LI Zhuohui, et al. Design and implementation of disaster investigation training system for power grid line based on CAVE virtual reality technology[J]. Southern Energy Construction, 2021, 8(S1): 10-19(in Chinese).
- [7] 缪巍巍, 吴海洋, 于宝辉, 等. 基于状态感知的电力通信设备自动巡检研究[J]. 无线互联科技, 2018, 15(22): 7-10.
MIAO Weiwei, WU Haiyang, YU Baohui, et al. Study on the automatic inspection of power communication equipment based on state perception[J]. Wireless Internet Technology, 2018, 15(22): 7-10(in Chinese).
- [8] 周毅, 周良才, 沈颖平. 基于数字孪生的华东电网安控系统虚拟建模及实现[J]. 电器与能效管理技术, 2021(6): 47-51.
ZHOU Yi, ZHOU Liangcai, SHEN Yingping. Modeling and implementation of east china power grid security and stability control system based on digital twin[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2021(6): 47-51(in Chinese).
- [9] 郭庆来, 辛蜀骏, 孙宏斌, 等. 电力系统信息物理融合建模与综合安全评估: 驱动力与研究构想[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(6): 1481-1489, 1761.
GUO Qinglai, XIN Shujun, SUN Hongbin, et al. Power system cyber-physical modelling and security assessment: motivation and ideas[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1481-1489, 1761(in Chinese).
- [10] 郭庆来, 辛蜀骏, 王剑辉, 等. 由乌克兰停电事件看信息能源系统综合安全评估[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(5): 145-147.
GUO Qinglai, XIN Shujun, SUN Honghui, et al. Comprehensive security assessment for a cyber physical energy system: a lesson from Ukraine's blackout[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(5): 145-147(in Chinese).
- [11] 王云, 刘东, 陆一鸣. 电网信息物理系统的混合系统建模方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(6): 1464-1470, 1759.
WANG Yun, LIU Dong, LU Yiming. Research on hybrid system modeling method of cyber physical system for power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1464-1470, 1759(in Chinese).
- [12] 薛禹胜, 李满礼, 罗剑波, 等. 基于关联特性矩阵的电网信息物理系统耦合建模方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(2): 11-19.
XUE Yusheng, LI Manli, LUO Jianbo, et al. Modeling method for coupling relations in cyber physical power systems based on correlation characteristic matrix[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(2): 11-19(in Chinese).
- [13] 王振刚, 陈渊睿, 曾君, 等. 面向完全分布式控制的微电网信息物理系统建模与可靠性评估[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2413-2421.
WANG Zhengang, CHEN Yuanrui, ZENG Jun, et al. Modeling and reliability assessment of completely distributed microgrid cyber physical system[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2413-2421(in Chinese).
- [14] XIN Shujun, GUO Qinglai, SUN Hongbin, et al. Cyber-physical modeling and cyber-contingency assessment of hierarchical control systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(5): 2375-2385.
- [15] CAI Qinqin, YI Zhongkai, XU Ying, et al. A generalised dynamic energy flow model in multi-energy network[J]. Energy Internet, 2024, 1(2): 176-187.
- [16] 孙充勃, 成晟, 原凯, 等. 基于节点映射模型的电力信息物理系统实时仿真平台[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2368-2377.
SUN Chongbo, CHENG Sheng, YUAN Kai, et al. Real time simulation platform of power cyber-physical system based on node mapping model[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2368-2377(in Chinese).
- [17] 付灿宇, 王立志, 齐冬莲, 等. 有源配电网信息物理系统混合仿真平台设计方法及其算例实现[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(24): 7118-7125.
FU Canyu, WANG Lizhi, QI Donglian, et al. Design and experiments of active distribution network CPS simulation platform[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(24): 7118-7125(in Chinese).
- [18] 李宏仲, 郭相辰. 基于 Petri 网的配电网信息物理系统可靠性评估[J]. 电网技术, 2023, 47(1): 347-359.
LI Hongzhong, GUO Xiangchen. Reliability evaluation of cyber-physical system of distribution network based on Petri net[J]. Power System Technology, 2023, 47(1): 347-359(in Chinese).
- [19] LIU Ren, VELLAITHURAI C, BISWAS S S, et al. Analyzing the cyber-physical impact of cyber events on the power grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(5): 2444-2453.
- [20] HUANG Jinliang, HAN Wei, TIAN Hanlei, et al. The application and challenge of energy router in energy internet[J]. Energy Internet, 2024, 1(1): 14-26.
- [21] SUN Hongbin, GUO Qinglai, SHEN Xinwei, et al. Energy internet: redefinition and categories[J]. Energy Internet, 2024, 1(1): 3-8.
- [22] XUE Yusheng, YU Xinghuo. Beyond smart grid-cyber-physical-socialsystem in energy future[point of view][J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(12): 2290-2292.
- [23] 柳文轩, 赵俊华, 黄杰, 等. 面向能源领域信息物理社会系统的行为仿真建模分析——以现货电力市场为例[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(4): 8-15.
LIU Wenxuan, ZHAO Junhua, HUANG Jie, et al. Simulation and modelling analysis on behavior of cyber physical social system in energy: a case in electricity spot market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(4): 8-15(in Chinese).
- [24] 卢俞帆, 刘念, 高舜安. 融合信息物理社会因素的配电网可靠性评估方法[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(3): 51-61.
LU Yufan, LIU Nian, GAO Shunan. Reliability assessment method for distribution network incorporating cyber-physical-social factors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(3): 51-61(in Chinese).
- [25] 宋梦, 周佳妮, 高赐威, 等. CPSS 视角下城市建筑与配电网高韧性协调运行: 研究述评与展望[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(23): 105-121.
SONG Meng, ZHOU Jiani, GAO Ciwei, et al. High-resilience coordinated operation of urban buildings and distribution networks from cyber-physical-social system perspective: research review and prospect[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(23): 105-121(in Chinese).
- [26] 曹瑾. 基于 CPSS 的电动汽车充电优化调度研究[D]. 芜湖: 安徽

- 工程大学, 2023.
- [27] 辛保安. 新型电力系统构建方法论研究[J]. 新型电力系统, 2023, 1(1): 1-18.
XIN Baoan. Research on the methodology of constructing new power systems[J]. New Type Power Systems, 2023, 1(1): 1-18(in Chinese).
- [28] 工业 4.0 研究院. 数字孪生电网白皮书[EB/OL]. [024-05-15].
<http://www.innovation4.cn/library/r53857>.
- [29] 沈沉, 曹妍妮, 贾孟硕, 等. 电力系统数字孪生的概念、特点及应用展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(2): 487-498.
SHEN Chen, CAO Qianni, JIA Mengshuo, et al. Concepts, characteristics and prospects of application of digital twin in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 487-498(in Chinese).
- [30] 陈国平, 李明节, 董昱, 等. 构建新型电力系统仿真体系研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(17): 6535-6550.
CHEN Guoping, LI Mingjie, DONG Yu, et al. Research on the simulation technology architecture for the new-type power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(17): 6535-6550(in Chinese).
- [31] 康重庆, 杜尔顺, 郭鸿业, 等. 新型电力系统的六要素分析[J]. 电网技术, 2023, 47(5): 1741-1750.
KANG Chongqing, DU Ershun, GUO Hongye, et al. Primary exploration of six essential factors in new power system[J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 1741-1750(in Chinese).
- [32] 齐晓琳, 吕闫, 韩昶, 等. 基于智能体的非玩家角色智能模拟技术及在调控仿真培训中的应用[J]. 现代电力, 2020, 37(4): 399-407.
QI Xiaolin, LV Yan, HAN Yi, et al. BDI agent based non-player-character intelligent simulation technology and its application in dispatcher training simulator[J]. Modern Electric Power, 2020, 37(4): 399-407(in Chinese).
- [33] 沈沉, 陈颖, 黄少伟, 等. 新型电力系统仿真应用软件设计理念与发展路径[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(10): 75-86.
SHEN Chen, CHEN Ying, HUANG Shaowei, et al. Design idea and development path of simulation application software for new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(10): 75-86(in Chinese).
- [34] 陈典, 陆润钊, 张松涛, 等. 新型电力系统电力电量平衡计算分析技术综述[J]. 电网技术, 2023, 47(10): 3952-3970.
CHEN Dian, LU Runzhao, ZHANG Songtao, et al. Review of new power system power balance calculation and analysis techniques[J]. Power System Technology, 2023, 47(10): 3952-3970(in Chinese).
- [35] 刘俊磊, 刘新苗, 娄源媛, 等. 考虑源荷储不确定性的新型电力系统随机生产模拟方法[J]. 南方电网技术, 2024, 18(6): 36-42.
LIU Junlei, LIU Xinmiao, LOU Yuanyuan, et al. Stochastic production simulation method for new power system considering uncertainty of source network load and storage[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(6): 36-42(in Chinese).
- [36] 李家钰, 秦文萍, 景祥, 等. 台风灾害下考虑连锁故障的电力系统弹性评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(1): 14-22.
LI Jiayu, QIN Wenping, JING Xiang, et al. Power system resilience assessment considering cascading failure under typhoon disaster[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(1): 14-22(in Chinese).
- [37] 唐文虎, 杨毅豪, 李雅晶, 等. 极端气象灾害下输电系统的弹性评估及其提升措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(7): 2244-2254.
TANG Wenhui, YANG Yihao, LI Yajing, et al. Investigation on resilience assessment and enhancement for power transmission systems under extreme meteorological disasters[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2244-2254(in Chinese).
- [38] 张广伦, 钟海旺. 信息熵在电力系统中的应用综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(16): 6155-6180.
ZHANG Guanglun, ZHONG Haiwang. Review and prospect of information entropy and its applications in power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(16): 6155-6180(in Chinese).
- [39] DING Lijie, BAO Zhejing. Analysis on the self-organized critical state with power flow entropy in power grids[C]//2nd International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation. Changsha: IEEE, 2009.
- [40] 梁才, 刘文颖, 温志伟, 等. 电网组织结构对其自组织临界性的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(20): 6-11.
LIANG Cai, LIU Wenying, WEN Zhiwei, et al. The influences of power grid structure on self-organized criticality[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(20): 6-11(in Chinese).
- [41] 吴伟丽, 刘连光, 王开让. 磁暴扰动下电力系统故障风险评估方法与模型[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(4): 830-839.
WU Weili, LIU Lianguang, WANG Kairang. Risk assessment methods and models of power system fault due to geomagnetic disturbance[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(4): 830-839(in Chinese).
- [42] FAN Shixiong, GUO Jianbo, MA Shicong, et al. Enabling artificial intelligence-based scenario application in new type power systems[J]. Energy Internet, 2024, 1(1): 9-13.
- [43] DONG Zhaoyang, WANG Tianjing. Artificial intelligence driving perception, cognition, decision-making and deduction in energy systems: State-of-the-art and potential directions[J]. Energy Internet, 2024, 1(1): 27-33.
- [44] 韩笑, 郭剑波, 蒲天骄, 等. 电力人工智能技术理论基础与发展展望(一): 假设分析与应用范式[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(8): 2877-2890.
HAN Xiao, GUO Jianbo, PU Tianjiao, et al. Theoretical foundation and directions of electric power artificial intelligence (I): hypothesis analysis and application paradigm[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(8): 2877-2890(in Chinese).
- [45] 蒲天骄, 张中浩, 谈元鹏, 等. 电力人工智能技术理论基础与发展展望(二): 自主学习与应用初探[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(10): 3705-3717.
PU Tianjiao, ZHANG Zhonghao, TAN Yuanpeng, et al. Theoretical primer and directions of electric power artificial intelligence (II): self-directed learning and preliminary application[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(10): 3705-3717(in Chinese).
- [46] 张俊, 徐箭, 许沛东, 等. 人工智能大模型在电力系统运行控制中的应用综述及展望[J]. 武汉大学学报(工学版), 2023, 56(11): 1368-1379.
ZHANG Jun, XU Jian, XU Peidong, et al. Overview and prospect of application of artificial intelligence large model in power system operation control[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2023, 56(11): 1368-1379(in Chinese).
- [47] 梅生伟, 薛安成, 张雪敏. 电力系统自组织临界特性与大电网安全[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [48] 郭凌旭, 刘金波, 段丽娟, 等. 电力调度元宇宙架构及关键基础技术验证研究(上): 复杂系统设计原理及架构设计[J]. 电网技术, 2025, 49(3): 1109-1120.
GUO Lingxu, LIU Jinbo, DUAN Lijuan, et al. Research on the verification of power dispatch metaverse architecture and key basic technologies (part I): design principles and architecture design of complex systems[J]. Power System Technology, 2025, 49(3): 1109-1120 (in Chinese).



郭凌旭

在线出版日期: 2024-08-26.

收稿日期: 2024-05-16.

作者简介:

郭凌旭(1974), 男, 硕士, 正高级工程师, 天津市“131”智能电网调度控制创新型人才团队带头人, 主要研究方向为电力系统调度自动化、人工智能技术在电力调度领域应用等, E-mail: lingxuguo@126.com;

齐晓琳(1992), 女, 硕士, 通信作者, 主要研究方向为电网调度自动化、调控培训仿真等, E-mail: qixiaolin1992@126.com.

(责任编辑 徐梅)