

超大型城市虚拟电厂的数字孪生 框架设计及实践

周翔¹, 贺兴², 陈赞¹, 罗潇¹, 王佳裕¹, 艾芊², 韩焯宸²

1. 国网上海市电力公司, 上海市 浦东新区 200122;
2. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海市 闵行区 200240)

Digital Twin Framework Design of Virtual Power Plant and Its Application Prospect in Mega-cities

ZHOU Xiang¹, HE Xing², CHEN Yun¹, LUO Xiao¹, WANG Jiayu¹, AI Qian², HAN Yechen²

1. State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Pudong New Area, Shanghai 200122, China;
2. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Minhang District, Shanghai 200240, China)

ABSTRACT: The energy system of mega-cities encompasses various heterogeneous distributed energy resource units (DERs), including uncertain new distributed generation units (e.g., photovoltaic, wind turbines), flexible demand-side units (e.g., air conditioning, thermal energy storage), and energy prosumer (e.g., electric vehicles, energy storage systems). Virtual Power Plant (VPP) has emerged as an effective aggregation to reshape the energy ecosystem of mega-cities and comprehensively manage those DERs. This paper begins by addressing the construction goals and development status of VPP in mega-cities. It points out the challenges current VPP projects face in dealing with multi-agent, multi-objective, and high-uncertain scenarios. Systematic solutions are lacking, including modeling, simulation, deduction, analysis, decision-making, and validation procedures. To address this challenge, this paper combines the overall digital architecture and construction progress of urban power grids, proposing a framework for the digital twin of VPP (VPP-DT). The VPP-DT framework uses virtual spaces to simulate and analyze various developmental pathways for energy systems. Furthermore, focusing on intelligent decision-making goals, we explore its technical pathways, key technologies, mathematical tools, and more within the framework. The framework has helped the implementation of the VPP project demonstration in Lingang's new area, which provides a reference for the construction of

VPP at the city level. Finally, this paper looks forward to the research direction and application prospect of digital twin VPP under megacities.

KEY WORDS: virtual power plant; distributed energy resource; digital twin; situational awareness; intelligent decision-making

摘要: 超大型城市能源系统汇集了多种分布式能源资源(distributed energy resources, DER), 包括具备不确定性的新能源发电单元(如光伏、风机), 具备可调性的柔性用能单元(如空调、蓄冷)以及兼具充放功能的能源产消者(如电动汽车、储能), 虚拟电厂(virtual power plant, VPP)已成为重塑上述DER生态关系并对其进行协同管控的有效途径。该文梳理了当前城市级VPP建设的目标与现状, 明确了超大型城市VPP工程所面临的挑战, 即对于由海量DER所诱发的多主体多目标高不确定性场景缺乏系统性的建模、仿真、推演、分析、决策与校核手段。为应对上述挑战, 该文结合城市电网数字化整体架构与建设进程, 提出了超大型城市VPP数字孪生技术框架, 继而得以对城市能源系统的态势轨迹进行系统性地推演与分析; 进一步, 聚焦智能决策目标, 探究了框架下的技术路径、关键技术、理论工具等。该框架已经助力临港新片区VPP工程示范落地, 为城市级VPP建设提供参考。最后, 展望了超大型城市下数字孪生VPP的研究方向与应用前景。

关键词: 虚拟电厂; 分布式能源资源; 数字孪生; 态势感知; 智能决策

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2023.2128

0 引言

0.1 城市级VPP的工程背景、基本理念与建设目标

在城市数字化转型与双碳战略推动下, 超大型城市(如上海)涌现出一批可观可控的用户侧分布式

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB2401204); 国家自然科学基金项目(52277111); 上海市科学技术委员会项目(21DZ1208300)。

Project Supported by National Key Research and Development Program of China (2021YFB2401204); National Natural Science Foundation of China (52277111); Science and Technology Commission of Shanghai Municipality (21DZ1208300).

能源资源(distributed energy resources, DER), 涵盖了特色负荷(如微网、能源岛、工业园区、交通枢纽、国际会场展馆、中央商务区等), 新能源(如风、光、热、气、生物质等), 用户侧储能(如电动汽车充电桩/站、蓄冷/蓄热楼宇等)等多种形式^[1-2]。然而, 随着 DER 占比不断提高, 城市能源系统的复杂性与不确定性显著增加, 可能导致一系列问题, 如峰谷差进一步拉大、电力/电量瞬时失衡、线路/变压器(反向)重载/过载事件频发等。在应对城市海量 DER 单元带来的挑战时, 传统能源管理模式已显乏力^[3]。传统模式主要关注“能源巨头”, 即大发电厂(例如火电机组)与大用户(例如炼钢厂、大飞机制造商); 他们的产能/用能单体体量大且相对稳定, 不容易受外界环境干扰, 彼此之间较为独立。与能源巨头不同, 城市 DER 往往单体规模较小但数量众多, 虽然具备一定的灵活资源、自主意识与能动性, 却缺乏大局观(不能直接被配网调控, 没有传统意义上的调度计划), 其最终决策与用能行为也容易受到市场、天气、交通、管理等诸多外界因素的影响^[4], 由此相互耦合更容易引发系统性风险^[5]。针对上述 DER, 虚拟电厂(virtual power plant, VPP)因其卓越的特性而崭露头角, 成为重塑城市能源系统 DER 生态关系并对其进行协同管控的有效途径^[6]。

从城市能源系统生态关系的角度出发, VPP 是衔接城市能源系统与用户终端的中间聚合体, 其核心理念在于聚合海量用户侧 DER 资源, 进而通过对 DER、DER 聚合体以及能源系统的精准认知与动态分层分区管控, 实现城市能源区域内/间的 DER 有序用能、互济互补等效果, 以达到降低管理复杂性与平滑不确定性等目的^[7]。作为中间聚合体, VPP 的特性表现如下: 1) VPP-上级调度。VPP 可被视为一个单独的电源或受控负荷, 响应远程站点调控; 也可以作为自平衡细胞, 实现内部能量平衡。2) VPP-内部成员。VPP 有一定的自主权与能动性, 可以定制自身的管理机制、规划标准、交易竞价机制与调度响应策略等, 从而有效整合其所辖 DER 成员; 该点要求对多元 DER 的出力特性、成本结构与响应风险等的精准认知。3) VPP-协同。相比于微电网, VPP 在管控目的、管控环境、管控范围等方面展现出更好的灵活性, 可与各个层级单元(设备、微网、VPP、配网)展开交互, 从而更好地满足城市 DER 多元化、规模小、数量多、分布广的特点; 该点体现了 VPP 的广域协同优势^[8]。综上所述, 超大型城市 VPP 其建设目标为在满足能源供给安全、稳定、公平的大前提下, 通过构建 VPP 提升城

市 DER 及其聚合体的协同管控水平, 最终提升城市用能水平。

0.2 城市级 VPP 的建设现状与面临挑战

围绕上述目标, 城市级 VPP 目前已在上海、广东、江苏、浙江、福建、湖南等多地展开了示范性的探索, 并取得了一定成效——根据特定区域的能源结构与地理空间等特性, VPP 通过优化其运行方式、响应策略与商业模式, 实现了多能互补、削峰平谷、提升能效、缓解阻塞、绿色消纳等多种效益。

然而, 由于城市能源系统其运行方式多样、用能行为复杂、可调资源繁杂等现状, 当下城市 VPP 在实现自主、智能运营方面仍存在相当距离, 特别体现在资源接入、调节特性、资源聚合、态势感知与优化策略等方面: 1) 资源接入。VPP 在遴选 DER 接入时重“量”轻“质”, 即未能根据其调节目标与特性进行针对性的 DER 筛选。2) 调节特性。强调对其所辖 DER 在某一特定/理想/极端场景下的调节特性与功能策略的把控, 适用于“能源巨头”主导的能源体系; 然而, 由于缺乏对 DER(集群)的全面评价, 因此难以充分挖掘激活其在实际工况场景下的调节潜力。3) 资源聚合。聚合主要面向发用电特性参数的简单累加(如累加 DER 的出力曲线、装机容量等), 较少考虑海量异质 DER 的复杂特性耦合(如聚合 DER 的调控风险); 因此, 需要更系统的理论方法(如范畴学)来建模分析 DER 之间的复杂关系, 以更好地进行聚合与协同。4) 态势感知。态势感知仍停留在个体层面, 缺乏对聚合体乃至系统层面的完善态势感知功能, 故而难以全局统筹(需要系统性地考虑分析多重影响因素、多类主体相互作用、多条系统演绎路径等)。5) 优化策略。优化策略仍然面向少数“能源巨头”。综上所述, 当下 VPP 在面对由海量 DER 所诱发的多主体多目标高不确定性场景时, 缺乏系统性的建模、仿真、推演、分析、决策与校核手段。上述挑战突显了当前城市 VPP 体系需要更加智能和全面的系统性框架(而非仅仅算法)来解决城市能源系统的复杂性挑战。

0.3 城市 VPP 数字孪生框架的必要性与本文工作

基于上述背景, 本文提出了城市 VPP 数字孪生技术框架。框架的必要性如下: 1) 特性对接。VPP 特性需要与 DER(集群)的性质相结合, 而非套用传统“能源巨头”体系与还原论^[9-10]。2) 功能支撑。数字孪生技术以数据驱动、实时交互和闭环反馈为特点^[11], 为 VPP 提供了实现态势感知和虚拟推演两大功能, 从而支撑能源系统运管调控各项的决策制定^[12-13]。

本文工作主要包括：1) 框架提出。为超大型城市 VPP 提出了其数字孪生技术框架；通过将数字孪生设为 VPP 底座，提升了城市 VPP 在资源接入、调节特性、资源聚合、态势感知和优化策略等方面的性能表现。2) 数字技术融合。框架融合了大数据、物联网、人工智能等数字技术与数据科学^[10]，利用虚实交互技术在数字空间中对城市能源系统开展系统性的探究，涉及建模、仿真、推演、分析、决策与校核全环节，以此打破现实世界中物理机理和试错成本的限制。3) 应用实例展示。以上海临港新片区为例，展示了所提框架在工程实践中的应用，为城市级 VPP 建设提供了实际参考。

基于数字孪生技术框架，城市 VPP 对 DER 的管控将突破还原论与经典优化决策模式，进而实现对城市能源系统的多演绎路径推演、全方位态势感知与多维度统筹优化。该框架将指导超大型城市

VPP 建设，解决其所面临的复杂性与不确定性挑战，提高城市能源系统 DER 管控的综合效益与智能化水平。

1 城市级 VPP 的数字化架构与数字孪生

1.1 城市级 VPP 的数字化架构

虚拟电厂 VPP 作为城市新型电力系统^[14]的重要组成部分，将引领城市区域能源网的业务流程、管理模式和作业方式等方面的变革，为城市能源系统的绿色演进与数字化转型提供有力支撑。城市 VPP 建设并非从零开始的，而是在前期实践与经验的基础上逐步演进，是一个不断适应时代发展、城市变化的持续过程。因此，城市 VPP 建设不仅限于技术算法层面，而需要有成体系、多层次的系统性支撑。结合上海 VPP 实践，本节首先提出了超大型城市 VPP 的数字化整体架构，如图 1 所示。

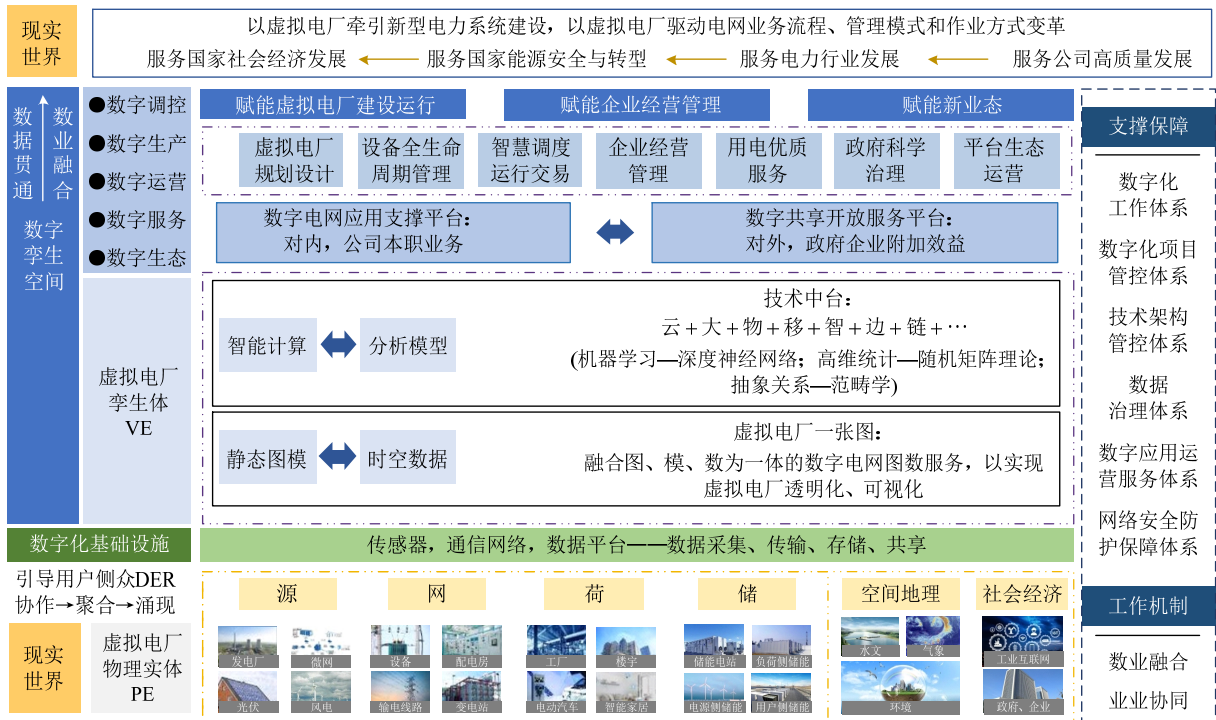


图 1 超大型城市 VPP 数字化整体架构示意图

Fig. 1 Digitalization architecture for VPP in the mega city

该架构强调了基于孪生技术的数据赋能与数据贯通，覆盖了数据采集、汇聚、分析和应用的全流程，构建起 VPP 数字孪生框架的生态环境。在物理空间，VPP 应当综合考虑城市中源网荷储等各类实体单元(physical entity, PE)、空间地理气候等各项环境条件以及城市社会交通经济等各类因素，基于传感器、通信网络、数据平台等数字化基础设施，采用数据/机理双驱动模式在数字空间创建 PE 的孪生模型(virtual entity, VE)，实现物理空间到数字空间的关联。

数字孪生技术的引入不仅总结了过去的实践经验，更对未来数字化转型方向进行了深刻思考。通过数字孪生技术，成功实现了将物理空间与数字空间关联的关键一步。VE 与 PE 的关系是一种抽象与具体的关联。VE 需要准确描述 PE 的静态特征、性能、行为以及演绎规则与演变过程等属性；VE 应具备主观能动性、聚合能力、协同能力和演化能力，以实现 PE(VPP 及其 DER)的各类行为与规则的精细化表征。通过 VE，实现物理空间与数字空间进行 1-N 映射^[15]，进一步可引出元宇宙的概念，

从而支撑虚拟测试、推演，以降低试错成本，甚至得以借助元宇宙衍生出“机器智能”^[16]。

通过数字空间，可将“云大物移智边链”等技术融入 VPP 技术中台，通过推演计算、迭代演进等机器算法，以及白箱物理机理模型、灰箱高维统计模型、黑箱深度神经网络以及它们的混合模型，在数字空间中基于 VE 模拟、推演并分析 DER 及其聚合体的复杂特性、行为及其影响，打造“透明化、可视化”的“图、模、数”一体化孪生系统，从而为认知、优化等功能提供全息视角。在数字业务层面，基于数字孪生体 VE 及其系统，通过数字调控、数字生产、数字运营、数字服务、数字生态的构建，打造了数字化工作、管控、治理、运营服务体系。

这为 VPP 的多项新业态服务提供了数字支撑，涉及规划设计、设备全生命周期管理、智慧调度运行交易、电力企业的业务流程再造、作业方式变革、运营模式优化、政府的科学治理以及电力市场等。

1.2 超大型城市 VPP 数字孪生技术框架

在数字化架构的基础上，进一步构建超大型城市 VPP 数字孪生技术框架，如图 2 所示。该技术框架是图 1 城市 VPP 数字化整体架构在数字孪生方面的深化。通过引入数字孪生技术，将工程实体、专业知识、机器算法、应用服务等要素通过数据在数字空间中紧密连接，形成了一个相互支撑、协同作用的生态圈，为城市级 VPP 的可持续发展与高效运营提供了系统性支撑。



图 2 超大型城市 VPP 数字孪生技术框架

Fig. 2 Digital twin technology framework for mega city VPP

数字孪生技术是解决超大型城市 VPP 中各资源主体机理描述和各主体间聚合涌现问题的核心。它借助虚拟孪生手段突破现实世界中“具体问题、具体分析”的模式，为特定问题提供了多层次、多尺度、多场景、多演化路径并考虑不确定性^[17]的多维认知视角，从而达成特定问题的系统性认知，最终在系统层面获得智慧/价值增益^[15]。

下面将在各个层面分别描述数字孪生技术与 VPP 的结合。1) 孪生建模层面。利用感知与人机交互技术、数据预处理技术，在 VPP 系统中实现数据的汇集、清洗、标准化和可视化；利用理论经验推导、参数辨识、数据挖掘等，对物理系统的运行状态、异常事件、故障等进行关键特征提取与因素溯源；通过机理、数据双驱动建模，开展知识(专业机理知识，经验)、数据(历史数据，虚拟数据)双驱动的参数辨识，建立 VPP 泛化孪生聚合体模型，实现 VPP 系统物理空间到虚拟空间的映射。2) 推演

分析层面。结合 VPP 的历史态、实时态运行数据、环境数据，构建孪生模型场景化体系；采用随机矩阵理论、深度学习等算法从增广数据矩阵中提炼出深层特征构建系统级高维统计量指标，进一步开展对 VPP 物理系统各类资源多时间尺度、多演化路径的全过程、全轨迹模拟，并借助平行数字空间预演各类资源的协调组态和交互共享行为，生产虚拟演进样本集，实现 VPP 各类资源的事件预测、策略预演，达到“以虚控/预实”，释放出“数力”。3) 智能感知层面。以数据获取和态势感知为基础，融合孪生系统数力(特别是虚拟演进样本集)、算法(特别是深度学习、高维统计、AI 大模型)、专家知识库等工具，运用人机混合智能技术，建立 VPP 孪生系统优化决策 AI 大模型，形成孪生“智力”。4) 应用层面。在 VPP 空间中形成静态、动态、推演、业务场景机理 4 张图，用以支撑 VPP 能源聚合调控、状态评估、全寿命周期管理、模拟推演等

一系列场景业务；通过综合机理模型、数值仿真、大数据、人工智能等技术的长处，基于机理、数据、专员的多方纠偏内在逻辑，对 VPP 各层级模型进行优化完善，实现其自适应(与内外环境、业务需求等保持一致)、自调节(模型关键参数可自动调节)、自演进(模型组织、结构与业务功能演进)功能，不断推进虚实结合，生成虚拟世界闭环和虚实交互闭环双闭环机制实现智能决策推进，达到“以虚优实”。

上述城市 VPP 数字孪生技术框架将重构 VPP 业务体系，为具体业务的智慧决策提供支撑。

2 基于数字孪生的 VPP 智能决策支撑技术

2.1 资源双驱动建模

如图 3 所示，VPP 数字孪生建模如下：首先，通过分析、采集不同类型设备(资源)的基本参数和运行特性，借助蒙特卡洛仿真生成^[18]多场景下的虚拟数据样本，构建描述不同设备(资源)互动特性的数据集，完成底层数据库建设。随后，对收集到的数据进行存储、处理和匹配(如深度神经网络法、高斯混合模型等)，并根据机理知识选取数据模型参数，实现对设备级机理模型的数字建模。最终，通过对历史事件(如异常事件、故障等)数据的收集和运行模拟，对孪生模型进行修正，形成多场景多层次并发的高还原度仿真模型，实现对资源过去运行状态的复现和对未来运行轨迹的预测。利用孪生体和实体的双向通信，开展在线学习和迁移学习，不

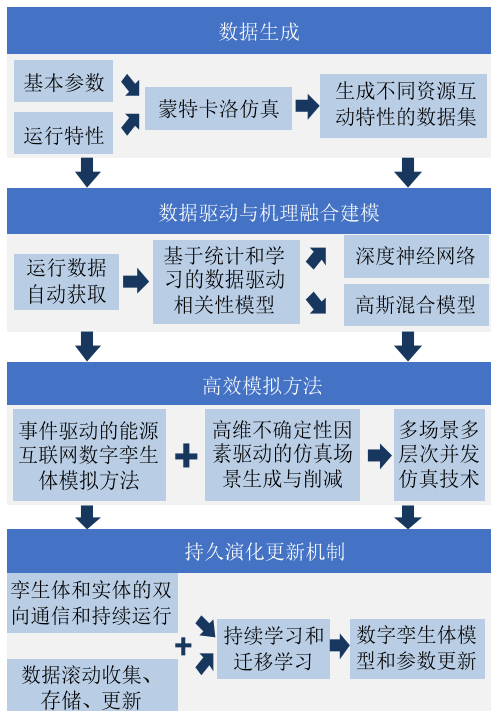


图 3 超大型城市 VPP 各类资源数字孪生模型构建方法
Fig. 3 Digital twin model construction method for various types of resources in mega city VPP

断提升完善数字孪生体模型，并逐步实现 VPP 的全局数字孪生模型构建。

2.2 城市 VPP 多层级态势感知

如图 4 所示，在状态感知上，将 VPP 按照“细胞级—组织级—系统级”3 个层级，通过大数据随机矩阵理论(random matrix theory, RMT)分析不同层级的功能及交互耦合机理，构建多层态势感知分析架构。通过分析各级孪生体间基于资源、数据和信息交互的合作博弈与聚合行为，运用高维统计特征方法对“细胞级—组织级—系统级”孪生体的数字表征进行指标及其关键特征提取。通过深度学习分析多层耦合数字孪生电网态势的时空演变规律，以及对“细胞级—组织级—系统”各层级单元的电能质量、可靠性等进行实时评估与推演预测，进一步支撑 VPP 的运行态势感知。

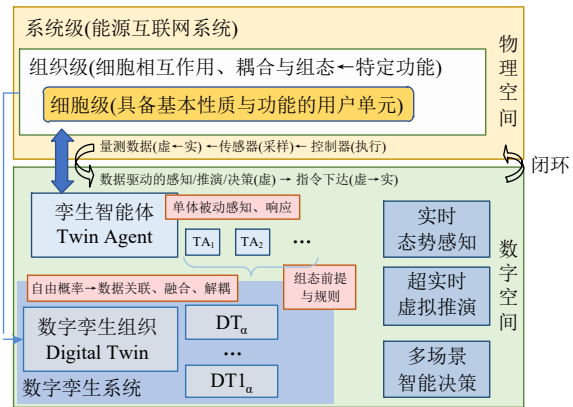


图 4 超大型城市 VPP 多层级状态感知
Fig. 4 Multilevel state awareness for mega city VPP

2.3 城市 VPP 优化运行智能决策

如图 5 所示，在智能决策方面，基于 2.2 节的多层耦合 VPP 态势预测结果，考虑不同资源的时序特性，以“细胞—组织—系统”视角展开分析，形成基于全景理论分析的 VPP 孪生体动态聚合。针对 VPP 的多主体目标体系，开展负荷预测以及自主决策与联合协调场景模拟；进一步，融合广义能量调度技术体系和多时间尺度智慧调度，最终生成 VPP 优化运行智能决策方案。

2.4 相关理论——随机矩阵理论与范畴论

超大型城市具备大规模的分布式主体，它们的种类、属性、资源和需求各异且往往具备较强的主动性与不确定性，其间耦合与相互作用不断交织，使能源系统的复杂度不断提升，挑战经典基于机理模型的电力系统分析方法。站在系统高度，系统呈现兼容开放、系统扁平、边界模糊、供需分散的特征，致使传统“面向能源巨头的源随荷动”式优化调度控制方法难以满足系统调控要求。该能源系统

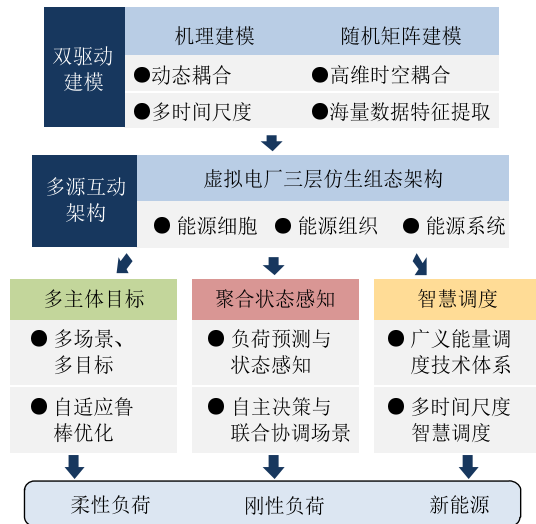


图5 三层仿生结构下的超大型城市VPP优化运行智能决策

Fig. 5 Intelligent decision making for optimized operation of mega city VPP based on three-layer bionic structure

及其复杂性所衍生的一系列问题已经超出了还原论的讨论范畴，即认为系统的特性可由单体简单累加所体现，而忽视了不同层次、不同主体之间的互动行为与涌现效应；为此，亟需系统性的认知手段及对应的数学量化分析工具。为了更好地理解超大型城市VPP中复杂的相互作用和耦合关系，本文引入了随机矩阵理论和范畴论两个相关理论作为孪生框架的核心算法，以应对系统高度复杂性、资源异质性和多空间映射等方面的挑战。

2.4.1 随机矩阵理论(random matrix theory, RMT)

本文引入RMT来处理超大型城市VPP中多个(同质)DER传感器所带来的结构化时空数据。目前，RMT已成功应用于电力系统态势感知、故障检测、稳定性评估与敏感因素分析等数个领域。通过分析多个DER所对应的多维时空数据其时空联合相关性，能够更充分地挖掘/处理传统意义上的无效信号(特别是低信噪比信号)，为洞察聚合体/系统的复杂行为现象提供了具备理论指导的新手段。

RMT是处理时空联合数据及高维统计数据的重要工具。随机矩阵是以独立同分布随机变量为元素所组成的矩阵。当随机矩阵的规模趋于无穷大时，其经验谱分布(empirical spectral distribution, ESD)满足单环定理、M-P律(Marchenko-Pastur law)和半圆律。在此基础上，进一步定义随机矩阵的线性特征值统计量(linear eigenvalue statistics, LES)，继而构建有效指标。上述定理均适用于中等或大规模的工程案例。RMT的理论基础和工程应用前景使其成为处理超大型城市VPP中多维数据的重要工具。

2.4.2 范畴论

范畴论的重要特点在于它剥离了每个对象的细节，将重心集中到研究对象间的抽象关系。近年来，范畴论在不同领域中的应用发展迅速。本文引入范畴论来描述超大型城市VPP中的复杂关系，包括异质VE间的关系、单元与聚合体间的关系以及不同空间(包括物理空间、数字空间、模型空间、感知空间和决策空间)之间的映射。范畴论在城市VPP中的应用潜力在于可以描述不同层级各个主体间的多种抽象关系，从而有望解决孪生体统一建模、多孪生体聚合、孪生聚合体协同与互动博弈等重要问题，并为具体业务的工具设计提供基础支撑。

范畴论是一门处理数学结构以及结构之间联系的数学理论，被称为数学的数学。该理论起源于代数拓扑领域，由数学家Samuel Eilenberg和Saunders Mac Lane提出，如今已成为大多数纯数学、部分应用数学和部分计算机科学领域的基础语言。近年来，有许多学者试图将范畴论引入语言学、神经科学、机器学习等涉及复杂系统的研究领域，且取得了一定进展。范畴论的基础概念包括范畴(category)、对象(object)、态射(morphism)、函子(functor)和自然变换(natural transformation)。一个范畴C由许多对象 $ob(C)$ 和对象之间的关系即态射 $hom(C)$ 组成。态射之间必须定义结合运算(composition)，其满足结合律且存在单位元。函子描述了范畴之间的关系，可以理解为保持两个范畴C和C'之间“结构不变”的函数。自然变换则进一步描述了函子之间的特殊关系。范畴论高度适用于不同层次、不同主体之间互动关系的统一建模。

综上所述，RMT和范畴论在处理超大型城市VPP中的复杂系统和多主体互动方面发挥着不可替代的作用，为深入理解城市VPP并优化其运行提供了重要理论支持。

3 临港片区VPP的工程实践

临港新片区拥有风电总装机约500MW，光伏总装机约200MW，洋山液化天然气气源约占上海燃气供应40%，居民楼宇光伏、虚拟电厂响应用户、电动汽车充电桩均具有一定规模，且涵盖集成电路、新能源汽车、大飞机制造商等重要用户，DER资源丰富，具有较好的VPP示范效益。

针对临港现状，本文融合了前文所述的城市级VPP数字化架构、VPP数字孪生技术框架与VPP智能决策支撑技术，设计出临港VPP智能管控平台，形成了协同运作的临港片区VPP，如图6所示。

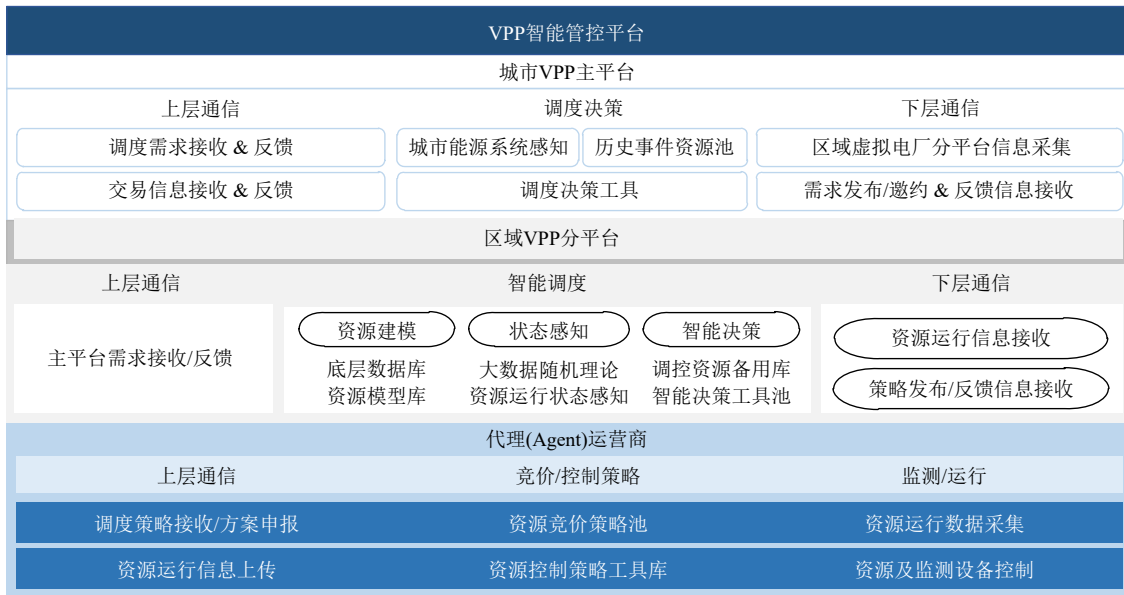


图 6 临港 VPP 数字孪生智能管控平台

Fig. 6 Digital twin intelligent control platform for Lingang VPP

这一数字化系统平台分为 3 个关键层面，以下是对各层面的详细描述：1) 代理(Agent)运营商。包括发电设备代理、储能元件代理和负荷侧代理。代理运营商具备最佳发电/需求控制、信息储存，以及与其他代理信息传输等功能，能够响应上层代理下发的调度指令。发电 Agent 负责向区域 VPP 提供运行状态、出力预测等信息，负荷 Agent 根据负荷的重要程度进行优先级划分，将不同种类的负荷信息发送给区域 VPP。根据区域 VPP 控制指令和自身约束动态调整发电/负荷量，并将自身电量信息等及时反馈给区域 VPP。2) 区域 VPP 分平台。负责监测、调度与控制区域内设备，根据区域动态划分原则建立起区域内各元件级代理的动态合作机制。该平台能够综合下层 Agent 所提供的信息，求解多目标优化问题，从而优先实现区域内的能量自治或电压控制等目标。可以根据电压等级扩展为两层或多层，以更好地应对复杂环境。3) 城市 VPP 主平台。其拥有上下层通信及调度决策模块，主要功能为接收城市电力调度控制中心所发布的需求信息，并根据该信息及 VPP 整体运行态势生成调度决策，实现多个 VPP 的跨区域协调及 VPP 与配电网之间的交互，进而实现城市能源系统全局优化调度，支撑城市供电。

基于 VPP 管控平台架构，本文开展临港区域配电网数字孪生系统示范，如图 7 所示。在数字孪生系统的数据信息建设方面，遵循 DL/T1867 互操作协议开发开放式接口，实现 VPP 系统各主体之间的实时信息互通操作。同时，积极构建具备自适应、自演进特性的 VPP 网架结构，打造 VPP 数字底座，

解决 VPP 系统“怎么建”的问题。在 VPP 运行规律计算推演方面，实施 VPP 各单元全过程精准态势感知，并结合基于高维数据分析的非典型态势表征及其特征提取方法，为 VPP 运行轨迹提供多维度认知与量化指标，开发 VPP 计算推演功能，解决孪生 VPP 系统“怎么算”的问题。在优化决策生成方面，完成资源注册、档案管理、资源模型库建设；完成 VPP 资源备用策略、交易曲线数据以及管控工具库等的智能决策建设，并持续研究基于人机混合增强智能大模型技术，着重考虑调度计划制定(停电预案生成、检修队派遣、故障风险研判、故障影响力分析、故障仿真推演)、单元协同控制(削峰评估、空调负荷调控、电动汽车有序充电、工业园区高效用能、可再生能源消纳、重要负荷保电)等业务，解决孪生配电网 VPP “怎么控”的问题。

通过上述措施，本文不仅解决了 VPP 系统中的“怎么建”、“怎么算”、“怎么控”的问题，而且为系统提供了高度灵活性和适应性，确保数字孪生系统在不同环境和操作场景中的有效运行。该数字孪生底层仿真以面向服务为设计理念，允许用户自由增删、连接、组合场景中的不同元素，针对不同的服务对象或目标搭建对应的仿真模型，能够适应各类环境变化与业务场景。仿真系统采用模块式编程与流式编程，将复杂系统解耦成一些相互独立的基础模块，基础模块之间通过数据流传输信息。仿真模块包括数据源(天气情况、交通网等)、可调控对象(新能源、电动车充电站、储能、调压设备等)、网络拓扑、潮流计算与数据输出(保存到数据库、作图等)，涵盖了超大型城市 VPP 的各类主体。

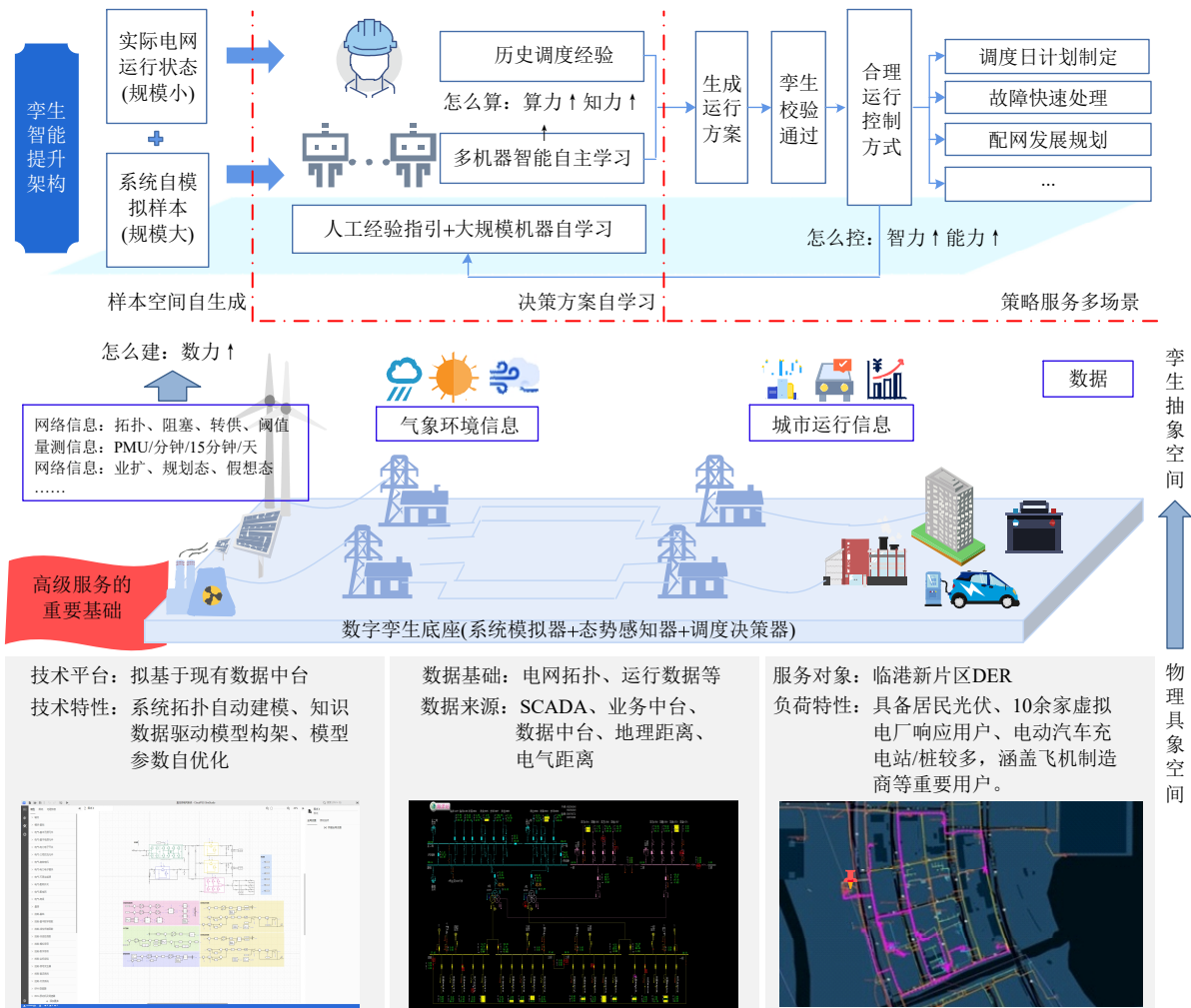


图 7 面向虚拟电厂 VPP 的临港新片区区域配电网数字孪生系统示范方案

Fig. 7 Demonstration scheme of digital twin system for regional distribution grid in Lingang New District considering VPP

基于上述城市级 VPP 实践,推动临港区域定制化 VPP 政策落地,联合临港管委会制定并发布《临港新片区虚拟电厂精准响应管理办法及实施方案(试行)》^[19],规定了 VPP 在临港新片区实施的总体目标,工作原则,参与主体及责任要求,运营管理模式,精准响应组织的启动条件、邀约与执行方式、结算方法,奖惩机制,应急处理办法和保障措施等。尤其在奖惩机制方面,在临港新片区探索 VPP 容量补贴(对于日前响应与日内响应备用容量按基础容量补助标准按 10 000 元每 MW 每年给予补助,对于快速响应备用容量按 1.5 倍基础容量补助标准给予补助,对于实时响应备用容量按两倍基础容量补助标准给予补助)、精准响应激励(快速响应按 3 元/(kW·h)、实时响应按 9 元/(kW·h)),为我国城市级 VPP 的进一步发展提供了重要的先行样板。

目前,已完成 64 家工商业客户通过 4 家虚拟电厂运营商接入 VPP 平台,其实景图如图 8 所示。12 月 20 日,上海市负荷管理中心通过 VPP 管理平

台,就 12 月 22 日晚高峰(20:00—21:00)下发虚拟电厂快速响应邀约,临港新片区共计 4 家虚拟电厂运营商携 64 户终端用户参与邀约,申报负荷 44 328kW。12 月 22 日 19:30, VPP 管理平台向 4 家虚拟电厂运营商下发基线负荷,20:00 各虚拟电厂运营商根据基线负荷对下辖用户可调节资源进行远程调节,并将负荷曲线数据实时上传至 VPP 管理平台,21:00 虚拟电厂响应结束,各虚拟电厂运营商停止对终端用户管控。最终,上海市负荷管理中心认定响应电量 22 984.61kW·h。临港 VPP 于 2023 年度冬峰期间完成正式响应 3 次,探索了基于全流程数字管控的虚拟电厂精准响应新范式。

4 结论

本文以超大型城市 VPP 建设需求为出发点,深入探究了超大型城市 VPP 建设的数字化架构、数字孪生技术框架、智能决策实施及相关数学工具等方面。同时,结合上海临港 VPP 工程的实际案例,对超大型城市中 VPP 的未来发展进行了展望。

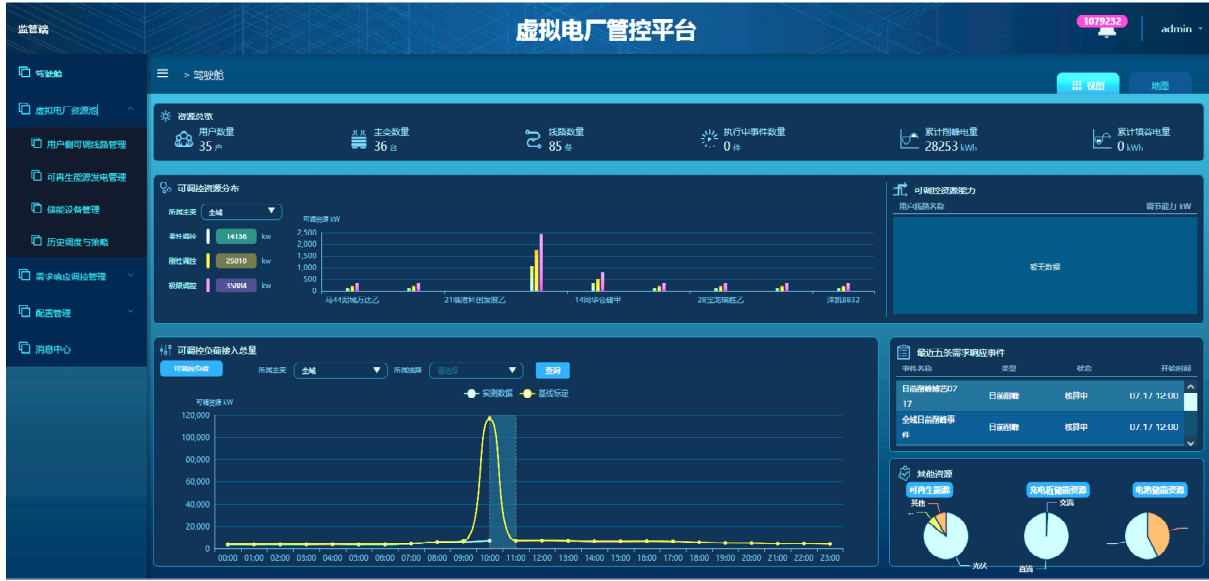


图 8 临港新片区虚拟电厂管控平台运行实景图

Fig. 8 Operation Scene of the Virtual Power Plant Control Platform in Lingang New District

在此基础上, 本文认为未来虚拟电厂需要在新技术和新业态上加大探索研究。新技术上, 依托数字化建设, 聚焦数据贯通、数业融合相关技术, 包括虚拟数字孪生、复杂系统建模与认知、AI+电力大模型等, 这些技术的应用将为后期 DER 的大规模接入和推广提供强大技术支撑。新业态上, 聚焦重塑新型电力系统生产关系, 将 VPP 各级平台作为基本底座, 改善现有业务并拓展新业务, 为用户、虚拟电厂运营商等相关方提供交互和赋能服务。通过技术和市场双重发力, 为推动超大型城市 VPP 可持续发展提供更多支撑。

参考文献

[1] 王继业. 人工智能赋能源网荷储协同互动的应用及展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(21): 7667-7681.
WANG Jiye. Application and prospect of source-grid-load-storage coordination enabled by artificial intelligence[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(21): 7667-7681(in Chinese).

[2] 张程, 罗玉锦, 陈昌亮. 考虑源荷不确定的多园区微网与共享储能电站协同优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(24): 77-89.
ZHANG Cheng, LUO Yujin, CHEN Changliang. Collaborative optimization operation of multi park microgrids and shared energy storage power stations considering source load uncertainty[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(24): 77-89(in Chinese).

[3] 张智刚, 康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806-2818.
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2818(in Chinese).

[4] HE Xing, CHU Lei, QIU R C, et al. Invisible units detection and estimation based on random matrix theory[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(3): 1846-1855.

[5] 舒印彪, 陈国平, 贺静波, 等. 构建以新能源为主体的新型电力

系统框架研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 61-69.
SHU Yinbiao, CHEN Guoping, HE Jingbo, et al. Building a new electric power system based on new energy sources[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 61-69(in Chinese).

[6] 艾芊. 虚拟电厂——能源互联网的终极组态[M]. 北京: 科学出版社, 2018.

[7] 张丽, 刘雨航, 贾晨豪, 等. 基于多分区自适应改进果蝇算法的风光燃储微电网协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(22): 13-23.
ZHANG Li, LIU Yuhang, JIA Chenhao, et al. A coordinated control strategy for a wind/photovoltaic/gas turbine/storage microgrid based on a multi-partition adaptive improved fruit fly algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(22): 13-23(in Chinese).

[8] 夏榆杭, 刘俊勇. 基于分布式发电的虚拟发电厂研究综述[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(4): 100-106.
XIA Yuhang, LIU Junyong. Review of virtual power plant based on distributed generation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(4): 100-106(in Chinese).

[9] 周二专, 张思远, 严剑峰, 等. 电网调控决策知识模型建模及实现方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(14): 5057-5066.
ZHOU Erzhan, ZHANG Siyuan, YAN Jianfeng, et al. Decision knowledge modeling and implementation for power grid dispatching and control[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(14): 5057-5066(in Chinese).

[10] 贺兴, 陈昱旻, 唐跃中, 等. 基于数字孪生与元宇宙技术的能源互联网态势感知系统论方法研究(一): 概念、挑战与研究框架[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(2): 547-560.
HE Xing, CHEN Minyu, TANG Yuezhong, et al. System theory study on situation awareness of Energy Internet of Things based on digital twins and metaverse (I): concept, challenge, and framework[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(2): 547-560(in Chinese).

[11] 贺兴, 艾芊, 朱天怡, 等. 数字孪生在电力系统应用中的机遇和挑战[J]. 电网技术, 2020, 44(6): 2009-2019.
HE Xing, AI Qian, ZHU Tianyi, et al. Opportunities and challenges of the digital twin in power system applications[J]. Power System Technology, 2020, 44(6): 2009-2019(in Chinese).

[12] 赵鹏, 蒲天骄, 王新迎, 等. 面向能源互联网数字孪生的电力物

- 联网关键技术及展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(2): 447-457.
- ZHAO Peng, PU Tianjiao, WANG Xinying, et al. Key technologies and perspectives of power internet of things facing with digital twins of the energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 447-457(in Chinese).
- [13] 高扬, 贺兴, 艾芊. 基于数字孪生驱动的智慧微电网多智能体协调优化控制策略[J]. 电网技术, 2021, 45(7): 2483-2491.
- GAO Yang, HE Xing, AI Qian. Multi agent coordinated optimal control strategy for smart microgrid based on digital twin drive[J]. Power System Technology, 2021, 45(7): 2483-2491(in Chinese).
- [14] 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).
- [15] 贺兴, 潘美琪, 唐跃中, 等. 基于数字孪生与元宇宙的能源互联网认知系统论(二): 面向复杂系统涌现现象的虚拟仿真推演框架[J/OL]. 中国电机工程学报, 2024: 1-13[2024-03-02]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.223425>.
- HE Xing, PAN Meiqi, TANG Yuezhong, et al. System theory on perception of Energy Internet of Things based on digital twins and metaverse (II): virtual simulation and analytical deduction framework for emergency phenomenon in complex system[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2024: 1-13[2024-03-02]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.223425>(in Chinese).
- [16] 贺兴, 唐跃中, 韩焯宸, 等. 基于数字孪生与元宇宙的能源互联网认知系统论(三): 复杂系统群智调控理论及其框架[J/OL]. 中国电机工程学报, 2024: 1-12[2024-03-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20240122.1749.002.html>.
- HE Xing, TANG Yuezhong, HAN Yechen, et al. System theory study on situation awareness of energy internet of things based on digital twins and metaverse (III): theory and framework for energy scheduling and management considering swarm intelligence[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2024: 1-12[2024-03-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20240122.1749.002.html>(in Chinese).
- [17] 梁远升, 程康, 王钢, 等. 基于概率预测与随机响应面法的新能源孤岛配电网实时风险评估与调控策略[J]. 电网技术, 2023, 47(12): 4948-4957.
- LIANG Yuansheng, CHENG Kang, WANG Gang, et al. Real-time risk assessment and regulation strategy of new energy islanded distribution network based on probabilistic prediction and stochastic response surface methodology[J]. Power System Technology, 2023, 47(12): 4948-4957(in Chinese).
- [18] 黄越辉, 孙亚南, 李驰, 等. 基于条件生成对抗网络的多区域风电短期出力场景生成方法[J]. 电网技术, 2023, 47(1): 63-72.
- HUANG Yuehui, SUN Yanan, LI Chi, et al. Constructing method of short-term output scenarios for multi-regional wind power based on conditional generative adversarial network[J]. Power System Technology, 2023, 47(1): 63-72(in Chinese).
- [19] 中国(上海)自由贸易试验区临港新片区管理委员会. 临港新片区虚拟电厂精准响应实施方案与管理办法发布[EB/OL]. [2024-04-02]. <https://www.lingang.gov.cn/html/website/lg/index/government/Environment/businessreading/tupianjiedu/c1729401983668883458.html>.



周翔

在线出版日期: 2024-03-07。

收稿日期: 2023-11-29。

作者简介:

周翔(1977), 男, 硕士, 从事电网企业管理、虚拟电厂、双碳战略等研究, E-mail: zhoux@sh.sgcc.com.cn;

贺兴(1986), 男, 副研究员, 通信作者, 硕士生导师, 研究方向为电力系统大数据分析、随机矩阵、数字孪生与元宇宙等, E-mail: hexing_hx@126.com;

陈赟(1982), 女, 硕士, 从事电网数字化转型、双碳战略等研究, E-mail: 78755096@qq.com;

罗潇(1987), 男, 从事电网数字转型、需求侧管理、电能质量管理等研究, E-mail: luoxiao0424@foxmail.com;

王佳裕(1991), 男, 硕士, 从事电网数字化转型、双碳战略、虚拟电厂等研究, E-mail: wjy911106@163.com。

(责任编辑 徐梅)