

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

郭凌旭^{1,2}, 刘金波³, 段丽娟¹, 王彬¹, 孙宏斌¹, 李伟⁴

(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. 国家电力调度控制中心, 北京市 西城区 100031;

4. 国网电力科学研究院有限公司, 江苏省 南京市 211106)

Research on the Verification of Power Dispatch Metaverse Architecture and Key Basic Technologies (Part I): Design Principles and Architecture Design of Complex Systems

GUO Lingxu^{1,2}, LIU Jinbo³, DUAN Lijuan¹, WANG Bin¹, SUN Hongbin¹, LI Wei⁴

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

4. State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 211106, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: As China's energy system enters the stage of high-quality transformation and development, the high-percentage new energy power system faces unprecedented complexity and uncertainty, which brings challenges to grid dispatch operation and management. This paper discusses the overall framework design and evolution path planning of constructing power dispatch digital command space (power dispatch metaverse) using meta-universe technology, aiming at combining power system simulation computing, digital twin, and mixed reality, and applying AI to analyze and predict and control the grid operation state to satisfy the technological challenges posed by the new type of power system, and also the pre-existing big data, cloud computing, and AI Precipitation in the power system fusion application, for the latest situation of power grid scheduling operation and management mode to provide a new exploration. This paper analyzes the challenges of scheduling control under the new power system and explains the motivation for constructing the power scheduling meta-universe. Based on the definition and connotation of the power dispatching metaverse, the methodology and basic theoretical framework of constructing the power dispatching metaverse are proposed. Design the system framework and

technical architecture of power dispatching metaverse, and analyze the application direction of the six supporting technologies of meta-universe in power dispatching metaverse. Propose the evolution path and operation ecology of the power dispatching metaverse and provide guidance and guarantee for the realization of its engineering application.

KEY WORDS: new power system; metaverse; dispatching metaverse; digital twin; architecture

摘要: 随着我国能源系统进入高质量转型发展阶段, 高比例新能源电力系统面临前所未有的复杂性和不确定性, 给电网调度运行管理带来挑战。该文探讨了利用元宇宙技术构造电力调度数字化指挥空间(电力调度元宇宙)的总体框架设计及演进路径规划, 旨在将电力系统仿真计算、数字孪生、混合现实结合, 应用 AI 来分析和预测、控制电网运行状态, 以满足新型电力系统带来的技术挑战, 也是前期大数据、云计算、人工智能沉淀在电力系统中的融合应用, 为新形势下电网调度运行管理模式进行新探索。该文分析了新型电力系统下调度控制面临的挑战, 阐述构建电力调度元宇宙的动因。在电力调度元宇宙定义及内涵基础上, 提出构建电力调度元宇宙实现方法。设计电力调度元宇宙体系框架和技术架构, 分析元宇宙六大支撑技术在电力调度元宇宙中的应用方向。提出电力调度元宇宙演进路径与运行生态, 为实现其工程化应用提供指导与保障。

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)).

关键词: 新型电力系统; 元宇宙; 调度元宇宙; 数字孪生; 架构设计

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2024.0845

0 引言

能源是现代经济和产业发展的生命线，推动新能源高质量发展是实现经济社会高质量发展的必由之路。构建新型电力系统是贯彻落实我国能源安全新战略、实现“碳达峰、碳中和”目标的重大需要^[1]。新型电力系统的核心特征在于电源结构呈现“风光为主，多源协调”的态势，以风能和太阳能为主的电源具有较强随机性和不确定性，导致电力系统运行和控制的复杂性持续增加^[2-3]。未来电网大范围资源配置能力将持续提升，呈现出“跨区互联”和有源“双向交互”的特点，系统安全稳定运行的风险增加，运行调度和安全管控的难度也随之提升^[4-5]。负荷侧呈现高度电气化负荷多元互动特征，分布式电源、新型储能^[6]、聚合商等新主体不断涌现，量大、分散且无序分布的负荷侧资源有效调控难度显著增加^[7-8]。新型电力系统中源-网-荷关系与作用将发生根本性改变，将会逐步发展形成一个多时空尺度、多层次、多系统耦合的复杂巨系统^[9]，运行与控制将发生显著变化。

电力系统中调度管理环节至关重要。自 20 世纪前半叶至今，电网调度从最初的数据采集与监测，发展到控制与管理，以及目前的智能决策支持^[10-11]，支撑了不同时期电力系统的发展^[12]。新型电力系统是一项极具挑战性、开创性、系统性的工程，亟待完善现有调度管理体系。而借助于云计算、虚拟现实、数字孪生^[13]、人工智能^[14]等形成的元宇宙^[15-16]，有望在提升调度管理业务承载能力、促进调度管理迭代升级、激发调度数字化变革等方面发挥重要作用。

本文重点探讨元宇宙在升级电力调度控制管理的方法与路径。第 1 节分析新形势下电力调度控制面临的新挑战。第 2 节提出了电力调度元宇宙的定义，探讨元宇宙对电力调度控制问题的新对策，提出电力调度元宇宙设计原理。第 3 节提出建设调度元宇宙的体系架构和关键技术应用设计，并给出指导工程应用的建设路径设计。第 4 节对全文工作进行总结与展望。

1 新形势下电力调度管控面临的挑战

1.1 电网调度控制方式亟待完善

新型电力系统背景下，电网调度控制方式优化日益迫切。随着新型电力系统中大量可再生能源的接入，系统的波动性和不确定性显著提升^[17]。供需平衡的复杂度，对系统调节的灵活性提出了更高要求，这为调度运行带来了前所未有的挑战。电网调

度控制已逐步从传统的大机组集中调度模式，转向集中与分散式相结合的混合控制模式。在此模式下，对分布式能源以及负荷侧可调节资源的整合与利用越来越凸显重要。因此，调度控制模式亟需在全面流程、全要素、全业务数字化的基础上进行迭代升级，以实现电力系统在源、网、荷、储等关键环节的高度协同运作，在宏观和微观上的协同控制^[18]。同时，迫切需要构建一个合理的市场机制，以激励和促进可调节资源在市场机制下广域互补协同调度^[19-22]，实现各方利益的最大化。

1.2 电网调度智能控制的内生演化能力待提升

近年来，国内省级以上调度机构依托云计算等先进 IT 技术构建了生产控制云(简称调控云)，扩展了电力调度自动化系统的内涵，显著提升了电网多级调控系统的协同处置、信息化支撑及全局资源共享能力^[23]，然而仍存在一些不足之处。新型电力系统具有“双高”特征，系统运行的随机扰动及对网络信息系统的依赖性持续增强，极易导致如设备级失稳、非同步电源与同步电源同步、系统功率平衡与频率稳定等问题^[24]。基于机理模型的电网分析计算范式越来越显现短板，亟待完善建设基于大数据、人工智能等先进技术的调度控制系统，以实现高效精准的电网态势感知^[25]，有效协同电网内外部资源，主动预测和抵御各类扰动，同时具备自学习和内生演化的能力，建立能够快速感知^[26]、智能风险识别^[27]、事故推演分析、智能化决策的全面运行控制体系^[28-30]。

1.3 复杂系统调度临场指挥手段缺乏且试错成本较高

一方面，新型电力系统中调度对象数量多、类型广，气象、交通等环境因素对电网影响度增强，调度管理的复杂性剧增，电网调度运行信息呈现海量多元化趋势。目前电网监视分析主要以二维接线图和数据图表的形式展现，抽象概念表达缺乏可视化呈现，调度员深入熟悉多种调度对象的临场化手段不足，需要较长时间来培养对新设备、新场景的调度掌控力。另一方面，新型电力系统源-网-荷高度耦合，运行环境更加复杂多变，因此对调度决策的实时性要求增加，要更及时、更精准地做出响应，导致电力调度人员的决策试错空间同步减少。亟待应用数字孪生、人工智能等技术向调度人员提供兼备正常运行操作、推演、学习等功能的技术支持手段^[31-32]，实现电网调度更科学更高效的决策，减少对调度员经验的依赖。

随着虚拟现实、数字孪生、交互技术等发展成熟，元宇宙以其逼真性、沉浸性、开放性、协作性

的优势,可为调度管理系统完善建设提供一套创新解决方案^[32]。本文提出以元宇宙作为载体、构建现实调度系统的平行虚拟空间,建设虚实相融合的、适应新型电力系统管理控制调度管理系统,为探索电力调度自动化技术体系新趋势提供路径。

2 电力调度元宇宙的概念及设计原理

2.1 电力调度元宇宙定义

元宇宙(Metaverse)是建立在人机交互技术、算力网络、区块链、数字孪生、人工智能等多种数字技术之上、“平行”于现实物理空间的虚拟数字化空间,即元宇宙是用数字技术构建的、由现实世界映射或超越现实世界,可与现实世界交互的虚拟世界,是由虚实相互渗透所形成的虚实共生社会新形态^[33-34]。电力调度元宇宙(power dispatch metaverse, PDMV)是以元宇宙为载体,以现有的电力调度控制体系为基础,在遵循一致的知识、理论、业务规则基础上,建造的一套新型的数字调度指挥体系,如图1所示。

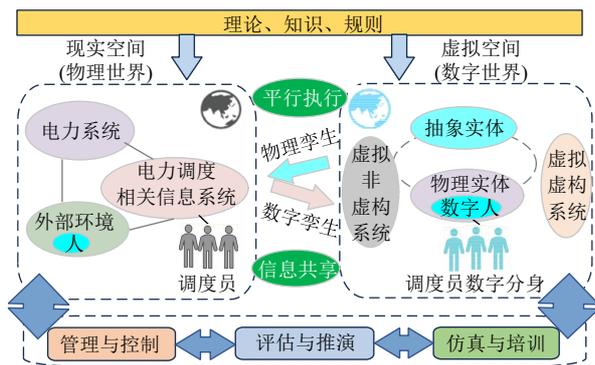


图1 基于PDMV的调度管理系统示意图

Fig. 1 Power dispatch metaverse diagram

基于PDMV的调度系统组成部分见图1。电力调度现实空间(物理世界)指现有的调度管理体系,包括物理系统(电力系统),电力调度相关信息系统(如传统能量管理系统(energy management system, EMS)、调控云等),外部环境(气象、交通、多能系统等),参与人员(如调度员等);电力调度虚拟空间(数字世界)由现实空间映射而来,包括物理实体映射(如电力系统、地理环境、交通网等),抽象实体映射(如电网拓扑等),虚拟非虚构系统(如虚拟调度大厅等),虚拟虚构系统(未来态电力系统等)、数字人与分身(如各级调度员、聚合商等)5部分。

基于PDMV的调度系统是由物理世界已有系统映射而成,可实现与物理世界已有系统交互,是具备控制与管理、评估与推演、仿真与培训、平行执行等电力调度控制业务功能的虚实共生空间,可实现对整个电力系统的优化运行和全生命周期管

理,进而达到降低运行维护成本以及为社会各领域的健康发展提供基本保障的效果。

基于PDMV的调度系统具有如下的新能力:

1) PDMV 将降低复杂电力系统认知难度。具有虚拟现实、增强现实等交互手段,兼备正常运行操作和学习、推演能力,为电力调度人员提供沉浸式操作体验,丰富调度员工作、培训学习方式。调度员在虚拟环境中模拟不同的调度场景,测试不同的调度策略,有效克服实际调度系统中不可重复、不可实验、培训成本高等弱点。

2) PDMV 将提升电力系统智能控制能力。与已有的电力调度系统实现信息共享、评估与推演、仿真与培训等业务功能,并通过虚实交互和平行执行功能,将优化计算结果在现实世界和虚拟世界同时执行,根据虚实反馈结果对比分析实现对虚拟系统优化。通过循环迭代发展,使调度控制系统具有了自我学习与内生演化能力,形成元宇宙智慧决策与控制范式。

3) PDMV 将为能源系统发展降低试错成本。在物理电网的完整映射基础上,通过虚实共生,不仅能够对当下的电力系统进行实时分析推演,也可以对“未来态电网”进行态势感知、风险评估,对拟发布的电力市场规则、能源行业政策进行超长时间尺度仿真和推演,为电网运行控制、电力系统规划乃至能源行业演进提供验证环境,降低行业发展试错成本。

2.2 电力调度元宇宙设计原理

新型电力系统具有开放、非线性、动态时变、涌现等复杂特征。PDMV是在新型电力系统背景下对现有调度系统的扩展和升级,构建PDMV需从电力系统、信息系统、外部环境等多维度进行综合考虑,以整体论为认识论基础,指导PDMV的设计与实现。将新型电力系统及其相关的自然环境、社会机构、人员看做整体,从非线性时变复杂巨系统角度,在数字空间中建立孪生对象,借鉴经典控制论(系统论、控制论和信息论)、自组织理论(耗散论、协同论和突变论)、复杂系统论等基础支撑理论,来赋值孪生对象的特性,及相互关联统计学特征。同时,结合CPSS理论,PDMV提供了一套有效的方法论支持,增强PDMV系统的适应性和响应能力,提高其对复杂环境变化的预测和管理能力,通过整合和协调物理系统与社会行为的动态,优化资源分配,提高能源效率;该方法论还力图促进跨学科研究合作,为解决能源和环境问题提供新的视角和工具。图2为构建PDMV的理论体系。

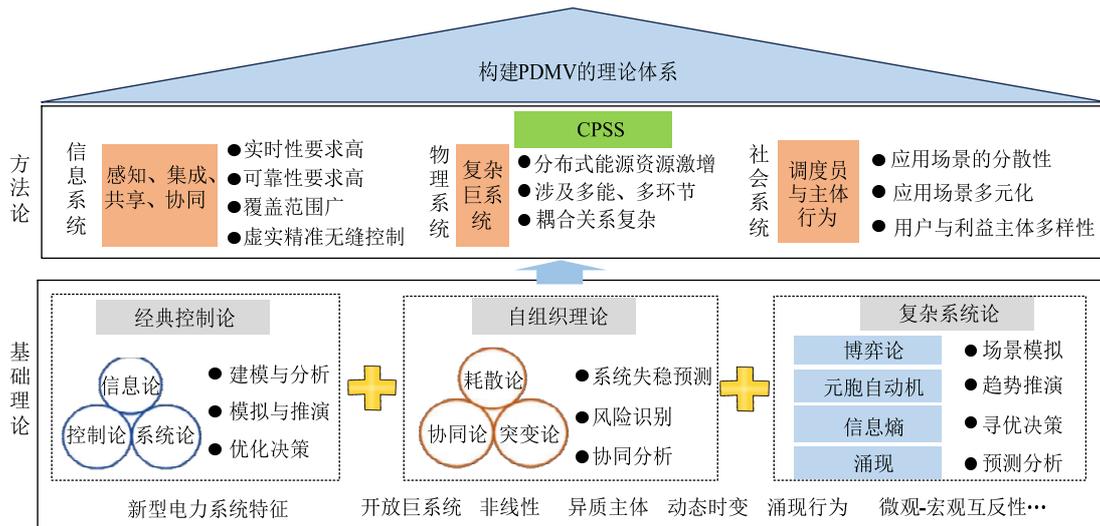


图2 构建 PDMV 的理论框架

Fig. 2 Construct theoretical framework for PDMV

2.2.1 系统论等基础理论在 PDMV 的应用

1) 经典控制论。

系统论(systems theory, ST)研究不同学科领域中各种不同系统所服从的共同原理与规律,用数学方法定量地描述其功能。PDMV 要实现复杂物理系统(电力系统、信息系统、外部环境等社会系统)的描述和模拟,通过系统论的理论支持,可以更好地理解和分析元宇宙中各个组成部分之间的相互作用和影响,从而提高模型的准确性和适用性。

控制论(control theory, CT)研究各类系统控制和通信的综合性交叉理论,通过观测反馈信息并做出调整,实现对系统的有效控制和优化。PDMV 未来可以基于真实数据或自定义变量值在元宇宙中对未来短期、中长期的电网运行情况进行推演,预测气象条件等环境及社会活动对电网产生的影响,实现对新型电力系统运行的未来状态进行推演,提前对调度策略和灾害、故障等做出反应。

信息论(information theory, IT)是一门用数理统计方法来研究信息的度量、传递和变换规律的科学,涉及概率论与数理统计。在构建电力调度元宇宙中,基于 IT 理论思想,在虚与实的交互中扩充信息采集范围,丰富信息维度,增加信息总量,实现对电网全景信息覆盖^[35]。

2) 自组织理论。

耗散结构论(dissipative structure theory, DST)运用在 PDMV 中,可推演电力系统演化过程,通过研究系统中的能量流和熵产生等机制,预测系统在何种条件下会失去稳定性。同时,在源-网-荷多重因素内外部共同作用下,展示系统的演化方向。

协同论(collaborative theory, CT)能够使 PDMV

的开放性和复杂性通过非线性相互作用产生协同效应。基于协同学定量分析 PDMV 内、外部因素对电力系统源-网-荷一储运行协同发展的影响,探索 PDMV 运营、可再生能源的未来发展态势,为实现电力供应、电力输送、用电需求与电能存储的彼此共进和持续协调发展提供新的思路。

突变论(mutation theory, MT)应用在 PDMV 系统扰动安全评估中,研究电力系统建立元宇宙专用突变论模型。当确定运行方式后,利用突变模型快速求解的优点,通过扫描找出危及安全运行的潜在故障形式^[36]。

2.2.2 复杂系统理论对 PDMV 构建的指导

复杂性科学在电力系统问题解决中的应用,取得了显著的研究进展^[37]。如文献[38]基于复杂网络基础理论,提出了一种降低网络脆弱性的拓扑重构策略,可提升电网的分形特性、降低小世界特性,显著提升复杂电力网络的鲁棒性。文献[39]提出了一种框架来应对复杂性问题,强调需要更全面的方法来处理复杂问题,涉及技术复杂性、政治复杂性和组织复杂性。文献[40]提出了一种复杂电力系统基于数据驱动的多层次建模和控制方法,能够优化大规模电力系统中的资源管理,该方法通过模型预测控制和分布式决策,管理不确定性和相关风险。复杂系统论对 PDMV 的构建、发展、治理都将提供很有价值的理论指导和参考。

1) 博弈论广泛用于主体建模和竞争关系分析。在 PDMV 中应用博弈论,针对电力市场竞争、电力系统发电规划、网架结构规划、电力系统控制等场景,可通过生成批量的覆盖式样本,实现时空全尺度的精准仿真以及各策略及未来演化路径的遍历,

开展电力市场模拟与电力系统调度模拟场景下的策略寻优^[41]。

2) 元胞自动机理论主要围绕故障演化、网络节点脆弱度、负荷预测等方向进行研究。将元胞自动机的概念引入到 PDMV 的虚拟环境中,可进行利用元胞自动机模拟各类分布式资源,定义元胞之间的交互规则,模拟电动汽车、分布式能源、负荷和储能设备之间的协同运行,捕捉电网系统与分布式能源的动态特性及交互效应^[42]。

3) 信息熵是信息论中度量信息、机会与不确定性的核心概念。电力系统中的状态估计、预测、控制决策与信息熵密不可分。信息熵理论可为 PDMV 在平行电网计算时提供运行边界,帮助其做智能决策,寻找最优推演方法;同时,利用信息熵表征新能源在不同时间尺度下的运行状态,评估系统当前状态的不确定性,甚至对能量的转化过程进行虚拟模拟优化,提高能源的利用效率,选择最优的调度策略^[43]。

4) 涌现是一种系统中新特性或行为的出现,其理解核心在于“整体大于局部之和”。这种现象常常对应于复杂系统中个体的有序聚集行为,即将原本分散的单元有机地组织在一起。在 PDMV 中,借助研究涌现现象来模拟大规模分布式能源资源的聚合管理,进而反馈到物理系统进行指导^[44]。借助电力调度元宇宙仿真模拟程度高、试错成本低的特点,在 PDMV 中可反复模拟新能源的聚合,依据大数据制定精准出力计划,分析出力计划的有效性与可靠性,评估其对出力波动的抑制效果。

2.2.3 基于 CPSS 的 PDMV 构建方法

信息物理社会系统 (cyber-physical-social systems, CPSS)是由物理系统、包括人的社会系统、连接二者的信息系统所共同构成的一类复杂系统,旨在实现对复杂网络系统的建模、推理和决策^[44]。2017年,薛禹胜院士将该理论引入能源系统,电力系统本质上是以物理电力系统为基础,以社会公共服务为导向,以信息技术为主要手段构建的高度融合的信息物理社会电力系统^[45]。新型电力系统受环境、气象等因素影响日趋增大,同时,新型能源体系建设中电力网与气网、热网、交通网等耦合日趋紧密,系统具备开放性与多元化发展特征,新型能源电力系统与人类社会活动和外部环境交织耦合,具备典型的人类社会属性^[46-47],新型电力系统调度管理体系同样存在 CPSS 特征。PDMV 本质上是在一致理论规则驱动下,对电力调度物理系统虚拟化和数字化的过程,本文提出以 CPSS 理论为方法论

构建 PDMV, 示意如图 3 所示。

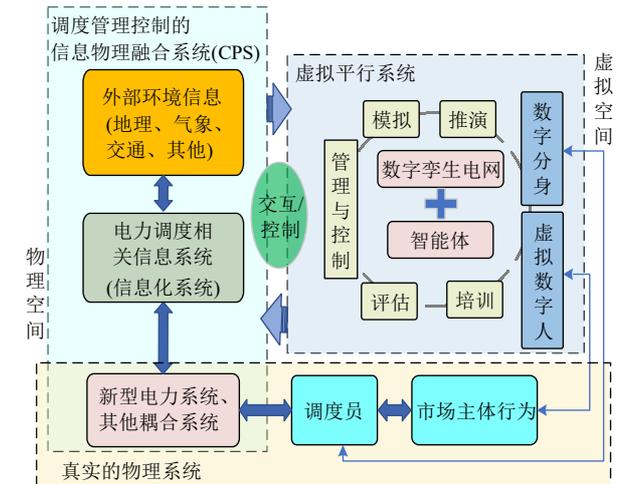


图3 基于 CPSS 理论的 PDMV 构建

Fig. 3 Diagram of PDMV based on CPSS

图 3 中, PDMV 将调度管理系统的 CPS、调度员、市场主体行为等从物理世界(含数字空间)迁移到虚拟世界。其中 C(信息)包括两部分: 1) 在物理空间, 现有的广泛意义上的电网调度系统, 包括新型电力系统、调度系统、外部环境等。2) 在虚拟空间, 包括数字孪生电网、智能体算法、业务功能等组成的系统^[48]。P(物理)指物理世界的电力系统、其他耦合系统及环境, 包括电厂、线路、负荷、地理气象环境等。S(社会)包括物理空间的调度员与市场主体行为活动, 同时也包括虚拟空间的虚拟数字人、数字分身行为活动。PDMV 可建立高度复杂的虚拟数字人, 模拟电力系统中包括调度交易机构、电厂、用户、负荷聚集商等组织中的从业人员行为。通过虚实业务融合与平行控制, PDMV 实现与已有调度管理 CPS 与人和系统的融合。

3 电力调度元宇宙的架构设计

3.1 PDMV 体系框架

本文为 PDMV 设计了体系框架, 确保其对结构理解有一个统一的标准。以现有的调度自动化系统为基础, 建设完善数字调度控制指挥体系。PDMV 体系建设框架包括基础支撑体系、技术体系、业务应用场景、运营生态保障等 4 部分, 如图 4 所示。

1) 基础支撑。包括物理系统、调度系统及理论支撑 3 部分, 以调度自动化系统为基础并映射到 PDMV, 调度员通过接入设备实现与 PDMV 交互, 通过虚实融合互动实现对电力系统调度管理。

2) 技术体系。构建 PDMV 关键技术(指区块链、交互、电子游戏、人工智能、网络及运算、物联网六大技术)的应用与技术实现架构(包括基础软硬件设施层、现实数据生成层、智能计算层、虚实数

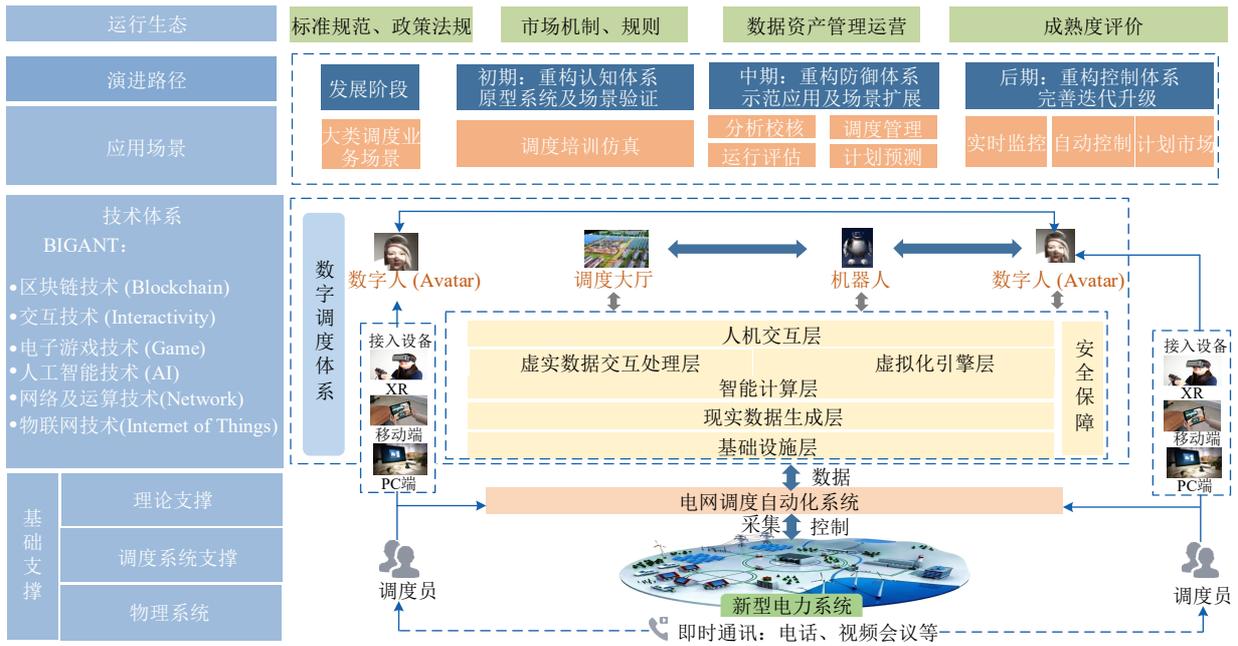


图 4 PDMV 体系组成及架构
Fig. 4 PDMV composition and architecture

据交互处理层、虚拟化引擎层、人机交互、安全保障等)。

3) 应用场景。PDMV 要实现的业务应用，主要包括调度员培训仿真、分析校核、计划预测、调度管理、运行评估、实时监控、自动控制、计划市场等。

4) 运营生态保障。PDMV 是调度虚拟数字化指挥空间，满足物理世界的法律法规、市场规则；构建物理世界与虚拟世界的数字资产运营机制，确

保信息交互的准确性、严肃性和实时性；构建 PDMV 成熟度评价体系，确保 PDMV 各阶段建设内容和成果满足应用需求与标准。

3.2 PDMV 关键设计

3.2.1 PDMV 技术架构

以现有的调度自动化系统为基础系统支撑建设 PDMV，技术架构由基础设施物理层、现实数据生成层、智能计算层、虚实交互处理层、人机交互层、安全保障等 6 部分组成，如图 5 所示。

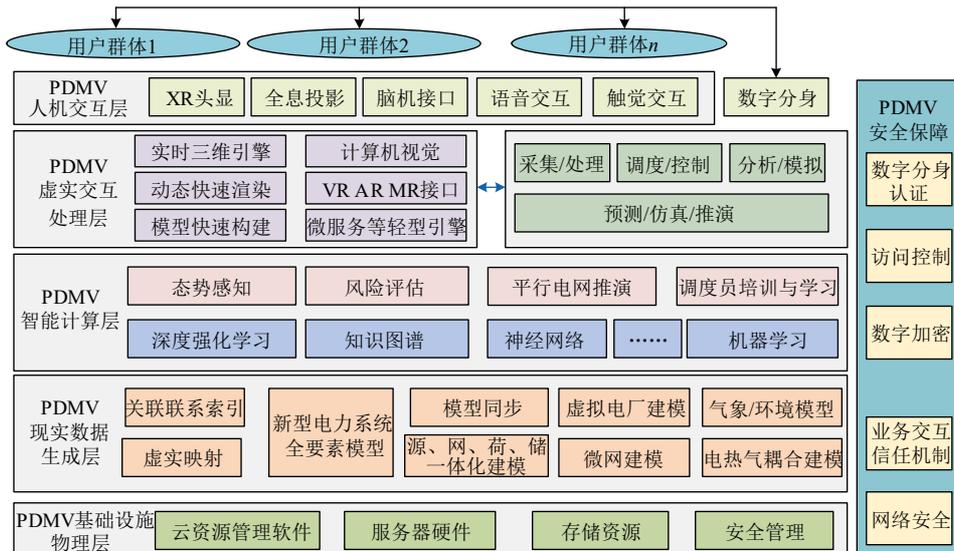


图 5 PDMV 技术架构
Fig. 5 PDMV technical architecture

1) 基础设施物理层。支撑整个 PDMV 架构的基础设施，涉及到物理设备、网络基础设施和硬件设施，为元宇宙的其他层提供必要的基本支持和运行环境。工程实施中，主要依托电力调度自

动化系统现有的网络、存储、云计算等通信和算力资源。

2) 现实数据生成层。即建模与数据采集、处理和场景生成，用于获取反映物理系统真实情况的

运行数据,实现虚拟世界和真实世界之间数据同步。处理的数据包括电网 SCADA 数据、各类实况监控数据、气象/地形/环境数据等。

3) 智能计算层。作为 PDMV 的“智慧大脑”,集成了各种智能化技术和算法,如深度强化学习、知识图谱、多模态大模型等 AI 技术,支撑实现预测、评估、推演、决策等 PDMV 业务,可提供面向调度员培训的场景生成与智能决策分析。

4) 虚实交互处理层。包括两部分:一部分实现 PDMV 虚拟空间人机交互接口,包括实时三维引擎、虚拟现实技术、动态快速渲染等关键技术;另一部分实现 PDMV 与物理系统的交互及反馈。

5) 人机交互层。专注于用户与 PDMV 的交互界面和体验,包括了各种设备、界面设计和交互式工具,使用户能够直观地操作、理解和参与到电力调度元宇宙系统中。现阶段用户仅包括调度员,未来有望扩展到电厂、能源用户等。

6) PDMV 安全保障。在现有电力安全防护要求下,通过访问控制、数字分身认证、数字加密、业务交互信任机制等保障 PDMV 运行、资产归属、能源交易的公平安全。

3.2.2 六大核心技术在 PDMV 中的应用

元宇宙技术基础可以用 BIGANT 来概括,其中, B(blockchain)为区块链技术, I(interactivity)为交互技术, G(game)为电子游戏技术, A(AI)为指人工智能技术, N(network)为网络及运算技术, T(internet of things)为物联网技术。本节对提出 BIGANT 在 PDMV 中的应用方向进行探索。

1) 区块链技术。区块链技术可以为元宇宙在安全隐私、抗抵赖、安全互操作等方面具有优势^[49]。在 PDMV 中,首先,使用区块链技术提供一种去中心化且不可篡改的人员数字身份验证机制,有效解决了调度员身份验证和权限管理的问题;其次,实现数字分身、虚拟数字人操作推演的上链和防篡改,保障操作记录的可信度和安全性。同时,利用区块链技术构建 PDMV 内部不同平台、PDMV 与其他元宇宙系统之间的互操作机制,实现不同平台中的虚拟资产和身份实现无缝迁移和互认。

2) 交互技术。利用运动恢复结构、稠密三维重建、纹理贴图等三维重建技术与语义分割技术,增强 PDMV 调度空间现实画面感,给调度人员提供沉浸式操作体验。扩展现实(extended reality, XR)技术在 PDMV 交互方面发挥着关键作用。但由于 XR 相关设备的购置成本较高,且相关配套的软件开发工具包(software development kit, SDK)也处于

高频度迭代的过程中,未来 PDMV 与 XR 技术结合是必然趋势。

3) 电子游戏技术。PDMV 采用电子游戏技术整合模型、测量数据和历史运行数据,通过实时三维引擎实现孪生电网的可视化。利用渲染技术构建真实场景和视觉效果,实现对电力系统的高保真复刻。通过数字孪生技术,将实际系统映射到数字空间,使用适应多类型业务场景的轻型引擎构建仿真环境。采用多对象模型动态快速渲染加载策略,完成虚拟调度大厅及调度员数字分身的建模,以三维可视化形式多维度呈现各类电力调度业务场景,创造出逼真的环境与互动临场感。

4) 网络及运算技术。网络及运算技术在 PDMV 中的应用主要包括以下两种形式:面向元宇宙沉浸多感交互的多终端网络接入和元宇宙移动终端安全通信,采用多通道、低延迟的通信网络,可以实现电网各个环节之间的信息传递和数据交换,为新型电力系统多种终端设备的接入和多样的信息形式提供了基础技术支撑。同时,在虚拟空间中实现 PDMV 环境的高度沉浸感和多感官交互,保证调度员在 PDMV 中的交互体验具有高度的实时性和流畅性。

5) 物联网技术。物联网技术使 PDMV 能够实时感知和处理电网数据,并在虚拟环境中进行电网模拟和优化,提高电力调度的精准性和灵活性,推动电力系统向更加智能化的方向发展。PDMV 在整体架构设计上参照泛在电力物联网理念,继承现有调度自动化系统,依托其汇集的海量模型数据,面向各类调度应用场景,打破了 PDMV 与电力现实世界的界限,实现“虚实结合”和“虚实共生”。

6) 人工智能技术。人工智能技术将为电力系统运行调控智能化带来前所未有的机遇^[50]。人工智能与 PDMV 业务结合的主要分为 4 个分支:深度学习、强化学习、知识图谱、大模型。

PDMV 应用深度学习技术建立高维神经网络模型,对历史电力负荷数据进行分析,提升电力需求预测能力^[51-52];此外,深度学习还能够应用于能源市场的价格预测,帮助电力公司在市场波动中优化购买和销售策略,降低成本并提高盈利能力。

PDMV 应用强化学习技术,通过与仿真环境交互,在线自主学习优化控制策略,解决在线决策类问题。利用强化学习技术可实现模拟环境和与环境的互动学习,优化调度员的决策过程,以及在突发设备故障或市场需求变动时能够快速调整生成最佳响应策略。

PDMV 应用知识图谱技术整合和建立电力系统中各种数据的关联性和属性,提供更全面的数据理解和决策支持,使电力系统获得挖掘和分析大规模文本信息中有关知识的能力,能够串联电力领域内零散的知识点,实现各种信息传感设备与通信信息资源结合,可以衍生出更智能的电力系统^[53]。

PDMV 应用 AI 大模型技术,利用其强大的自然语言处理和数据分析能力,实现高效的电力资源管理和优化。通过 AI 大模型技术分析设备传感器数据,预测设备故障,提前进行维护,减少突发故障和停机时间,优化电网运行稳定性和可靠性。结合元宇宙技术,能够在虚拟环境中自主模拟和优化运行,实现精准的仿真和策略优化。

综合来看,大电网特有的网络节点规模性、调控手段复杂性及调控结果多样性,使得人工智能技术在大电网调控中应用面临巨大挑战,人工智能技术利用深度学习、强化学习、知识图谱和大模型等不同技术在电力系统调度中进行有机融合^[54],为 PDMV 提供全方位的智能支持。这些技术的不断演进将进一步推动电力系统的智能化水平,提高电力调度的效率和可靠性。

3.3 PDMV 演进路径及评价体系设计

参考新型电力系统建设路线^[55],结合其发展各阶段对调度体系的要求,从数据、业务、技术维度,提出 PDMV 三阶段重点建设的内容,为 PDMV 工程化提供参考,如图 6 所示。

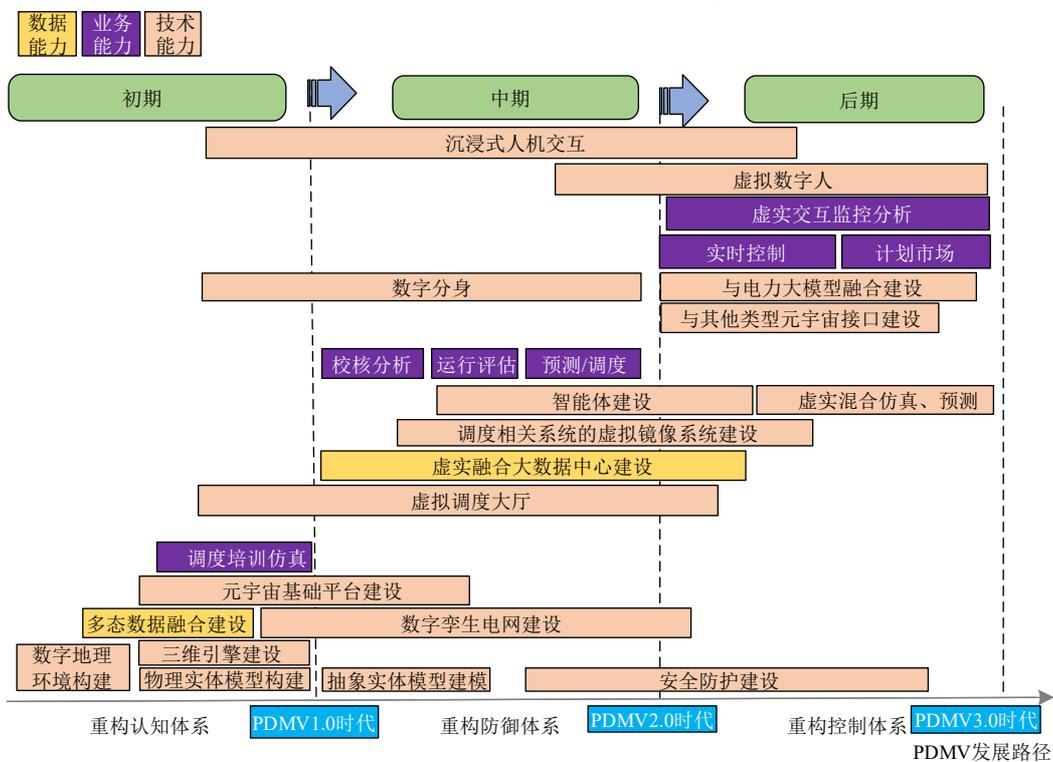


图 6 PDMV 演进路径

Fig. 6 PDMV evolution path

1) 初期: 重构认知体系。建设 PDMV1.0, 重点实现基础环境构造, 主要包括: 建模、数据融合接口、场景验证, 重点建设 PDMV 调度培训场景。建设虚拟调度员培训大厅, 支持构建仿真培训事件和任务; 实现包括数字分身及虚拟数字人在内的联合反事故演习场景, 支撑调度员在 PDMV 环境中进行培训、操作、人机交互、考核等工作, 提升教学与操作临场感及调度员对电网立体化整体性的认知。

2) 中期: 重构防御体系。建设 PDMV2.0, 重点实现智能体构造、技术迭代、场景扩展。重点建设 PDMV 校核分析、运行评估、计划预测和调度管理场景。利用 PDMV 数字指挥空间, 提升调度分析

校核业务一体化计算和故障处置时业务上下级协同能力、电网状态的动态演变分析提升故障模拟和处置能力、多维度关联分析技术提升预测仿真准确度和可视化呈现能力, 提高调度运行人员对电网未来态运行风险的把控能力。

3) 后期: 重构控制体系。建设 PDMV3.0, 注重业务场景智能化水平提升, 主要包括实时监控分析、计划市场、自动控制等。利用 PDMV 实现多位实时监控数据的综合时空关联表达; 完善建设调度数字人, 自动模拟调度员决策, 并可构建针对具体调度管理的场景与多个平行电网虚拟模型; 实时模拟多个电网在不同情景下的运行状况, 利用计算实

验对复杂系统和管控策略进行分析与评估,实现平行电网自主推演与最优方案选择,从而实现调度策略寻优与控制。

为确保 PDMV 可持续发展,参考技术就绪度(technology readiness level, TRL)评价方法,将 PDMV 技术成熟度等级分成了五级,即:一级(概念级)、二级(实验级)、三级(工程级)、四级(市场级)、五级(产业级)。针对调度培训仿真、调度管理、分析校核、计划预测、运行评估、实时监控、自动控制、主配协同调控等八大类调度业务场景,构建 PDMV 技术成熟度评价体系,主要评价维度包括:

1) 技术理论基础评价。评估适用于 PDMV 业务场景的相关技术基础理论、方法发展现状。

2) 调度规程合规性评价。评估 PDMV 相关技术应用及业务功能满足调度规程的情况。

3) 调度员反馈评价。获取调度员对 PDMV 使用的反馈意见,评价对实际使用系统的体验和效果。

4) 网络安全评价。评估 PDMV 在访问控制、权限、数据加密、传输安全等网络安全性上的表现。

5) 稳定与可靠评价。考察电力调度元宇宙技术在长时间运行和复杂环境下的稳定性和可靠性。

6) 应用案例实效评价。选取 PDMV 应用案例,了解 PDMV 在实际环境下的使用频率和效果。

3.4 PDMV 运行生态保障机制

PDMV 是调度的虚拟数字化指挥空间,涉及多调度对象在同一个空间内的信息传递,为确保信息交互的准确性和实时性,有必要构建 PDMV 运行生态保障机制。具体如下:

1) 政策法规与标准规范。在实施 PDMV 运行生态保障机制时,必须严格遵守电力行业相关监管法规和数据隐私保护法律,确保机制的合法性和用户权益的保护。同时建立 PDMV 业务技术标准,服务 PDMV 设计、建设、运行、维护等。

2) 市场机制、规则。PDMV 建设要与新型电力市场机制、规则同步与兼容,确保 PDMV 内部发展遵循能源电力市场共同确立的规则。

3) 数据资产管理运营机制。PDMV 需要建立完善的数据资产管理和运营机制,包括确保数据的安全存储和传输、建立有效的数据标准和共享机制、提升数据资产的价值和利用效率等方面。通过区块链技术、同态加密、智能合约等技术实现数据资产可信,确保数据资产管理的安全性与透明性,实现自动化流程以提升电力分配效率,实现数据资产的最大化效益。

4 结论与展望

本文面向新型电力系统背景下电网运行及调度管理面临的问题与挑战,以提高电力系统的智能化水平和调度效率,重塑调度支撑模式的现实需求展开研究,主要结论如下:

1) 提出以元宇宙为载体,在现有的电力调度自动化系统为技术支撑系统的基础上,构建新一代数字调度指挥体系。通过虚实融合手段,不仅能够对当下的电网进行实时分析、异常监测、推演,也可以对未来态电网进行态势感知、风险评估,为探索电力调度自动化技术体系新趋势提供路径。

2) 提出以经典控制论、自组织理论、复杂系统论为基础理论,以 CPSS 为方法论的电力调度元宇宙构建,并进一步分析了各理论在电力调度元宇宙业务中的应用方向。

3) 提出了电力调度元宇宙的体系架构;设计了电力调度元宇宙形成的技术架构,并分析了 BIGANT 技术在电力调度元宇宙应用场景,为电力调度元宇宙工程化提出了可行的技术路线。

4) 提出了电力调度元宇宙三阶段业务建设与发展规划,设计了技术成熟度评价体系,构建了电力调度元宇宙的运行生态保障机制,确保推动电力调度元宇宙的实施和发展。

电力调度元宇宙是新型电力系统背景下,发挥人工智能等新技术实现调度控制管理变革的有力工具。但元宇宙本身还属新兴事物,在电力能源领域的应用仍处于探索阶段,但其潜力不可忽视。后续将会在调度元宇宙虚实平行控制关键技术、智能体建设等方向持续开展研究。

致 谢

本文作者对中国电力科学研究院、北京用尚科技股份有限公司、上海商汤智能科技有限公司在论文撰写过程中提供的宝贵意见和建议,一并致谢。

参考文献

- [1] 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).
- [2] 汤广福.加快构建“四化”特征新型电力系统[N].国家电网报,2021-10-12(005).
- [3] 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).
- [4] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相, 等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1893-1904. ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904(in Chinese).
- [5] 刘吉臻, 王庆华, 胡阳, 等. 新型电力系统的内涵、特征及关键技术[J]. 新型电力系统, 2023, 1(1): 49-65. LIU Jizhen, WANG Qinghua, HU Yang, et al. Connotation, characteristics and key technologies of new power systems[J]. New Type Power Systems, 2023, 1(1): 49-65(in Chinese).
- [6] GUO Jianbo, JING Yiran, HOU Weilin, et al. Demands and challenges of energy storage technology for future power system[J]. Energy Internet 2024: 1(2): 116-122.
- [7] 孔祥玉, 马玉莹, 艾芊, 等. 新型电力系统多元用户的用电特征建模与用电负荷预测综述[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(13): 2-17. KONG Xiangyu, MA Yuying, AI Qian, et al. Review on electricity consumption characteristic modeling and load forecasting for diverse users in new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(13): 2-17(in Chinese).
- [8] 李更丰, 孙少华, 别朝红, 等. 面向新型电力系统弹性提升的储能优化配置与灵活调度研究综述[J]. 高电压技术, 2023, 49(10): 4084-4095. LI Gengfeng, SUN Shaohua, BIE Zhaohong, et al. Review on optimal configuration and flexible scheduling research of energy storage for resilience improvement of new power system[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(10): 4084-4095(in Chinese).
- [9] 郭剑波, 王铁柱, 罗魁, 等. 新型电力系统面临的挑战及应对思考[J]. 新型电力系统, 2023, 1(1): 32-43. GUO Jianbo, WANG Tiezhu, LUO Kui, et al. Development of new power systems: challenges and solutions[J]. New Type Power Systems, 2023, 1(1): 32-43(in Chinese).
- [10] 黄子萍. 电力调度自动化中的智能电网技术研究[J]. 现代工业经济和信化, 2023, 13(1): 168-169. HUANG Ziping. Research on smart grid technology in power dispatch automation[J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2023, 13(1): 168-169(in Chinese).
- [11] 桑博, 张涛, 刘亚杰, 等. 多微电网能量管理系统研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(10): 3077-3092. SANG Bo, ZHANG Tao, LIU Yajie, et al. Energy management system research of multi-microgrid: a review[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(10): 3077-3092(in Chinese).
- [12] 孙宏斌, 郭庆来, 吴文传, 等. 面向能源互联网的多能流综合能量管理系统: 设计与应用[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(12): 122-128, 171. SUN Hongbin, GUO Qinglai, WU Wenchuan, et al. Integrated energy management system with multi-energy flow for energy internet: design and application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(12): 122-128, 171(in Chinese).
- [13] 王榕泰, 吴细秀, 冷宇宽, 等. 数字孪生技术在新型电力系统中的发展综述[J/OL]. 电网技术, 2024: 1-21[2024-04-25]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.2108>. WANG Rongtai, WU Xixiu, LENG Yukuan, et al. A review of the development of digital twin technology in new type power systems[J/OL]. Power System Technology, 2024: 1-21[2024-04-25]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.2108>(in Chinese).
- [14] 冯斌, 胡轶婕, 黄刚, 等. 基于深度强化学习的新型电力系统调度优化方法综述[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(17): 187-199. FENG Bin, HU Yijie, HUANG Gang, et al. Review on optimization methods for new power system dispatch based on deep reinforcement learning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(17): 187-199(in Chinese).
- [15] 黄超, 卜思齐, 陈麒宇, 等. 元电力: 新一代智能电网[J]. 发电技术, 2022, 43(2): 287-304. HUANG Chao, BU Siqi, CHEN Qiyu, et al. Meta-power: next-generation smart grid[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(2): 287-304(in Chinese).
- [16] 沈健祺. 元宇宙下基于边缘的资源分配算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2022.
- [17] SUN Qiuye, HU Jie, WANG Rui, et al. Source-load cooperative frequency regulation based on virtual synchronous/asynchronous machine concept[J]. Energy Internet, 2024: 1(2): 188-199.
- [18] SUN Hongbin, GUO Qinglai, SHEN Xinwei, et al. Energy Internet: redefinition and categories[J]. Energy Internet, 2024: 1(1): 3-8.
- [19] 吴克河, 王继业, 李为, 等. 面向能源互联网的新一代电力系统运行模式研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(4): 966-978. WU Kehe, WANG Jiye, LI Wei, et al. Research on the operation mode of new generation electric power system for the future energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(4): 966-978(in Chinese).
- [20] 郭红霞, 陈凌轩, 张启, 等. 电力电量平衡视角下新型电力系统极端场景研究及应对综述[J/OL]. 电网技术, 2024: 1-27[2024-04-27]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.2268>. GUO Hongxia, CHEN Lingxuan, ZHANG Qi, et al. Research and response to extreme scenarios in new power system: a review from perspective of electricity and power balance[J/OL]. Power System Technology, 2024: 1-27[2024-04-27]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.2268>(in Chinese).
- [21] 郭松, 张明劫. 新型电力系统中的虚拟电厂模式与关键技术分析[J]. 电子技术, 2023, 52(11): 56-57. GUO Song, ZHANG Yuejie. Analysis of virtual power plant mode and key technologies in new power systems[J]. Electronic Technology, 2023, 52(11): 56-57(in Chinese).
- [22] 谭忠富, 王冠然. 新型电力系统下虚拟电厂技术应用与发展建议[J]. 华北电力大学学报(社会科学版), 2023(4): 29-39. TAN Zhongfu, WANG Guanran. Application and development suggestions for virtual power plant technology under the construction of new power system[J]. Journal of North China Electric Power University (Social Sciences), 2023(4): 29-39(in Chinese).
- [23] 许洪强. 调控云架构及应用展望[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3104-3111. XU Hongqiang. Architecture of Dispatching and Control Cloud and Its Application Prospect[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3104-3111(in Chinese).
- [24] 杨鹏, 刘锋, 姜齐荣, 等. “双高”电力系统大扰动稳定性: 问题、挑战与展望[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(5): 403-414. YANG Peng, LIU Feng, JIANG Qirong, et al. Large-disturbance stability of power systems with high penetration of renewables and inverters: Phenomena, challenges, and perspectives[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, 61(5): 403-414(in Chinese).
- [25] 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.
- [26] 张晓颖, 段金凤, 吴琦. 基于深度学习的智能电网稳定性预测[J]. 长春大学学报, 2022, 32(8): 1-7. ZHANG Xiaoying, DUAN Jinfeng, WU Qi. Smart grid stability prediction based on deep learning algorithm[J]. Journal of Changchun University, 2022, 32(8): 1-7(in Chinese).

- [27] 阮前途, 谢伟, 许寅, 等. 韧性电网的概念与关键特征[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(21): 6773-6783.
RUAN Qiantu, XIE Wei, XU Yin, et al. Concept and key features of resilient power grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(21): 6773-6783(in Chinese).
- [28] 陈江兴, 梁良, 付俊峰, 等. 基于大数据的智能电网数据调度与快速分发方法研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(6): 88-93.
CHEN Jiangxing, LIANG Liang, FU Junfeng, et al. Research on smart grid data scheduling and fast distribution method based on big data[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(6): 88-93(in Chinese).
- [29] 张晓华, 刘道伟, 吕先进, 等. 基于时变图的大电网稳定态势知识图谱建模及管理技术[J]. 电力信息与通信技术, 2023, 21(3): 1-9.
ZHANG Xiaohua, LIU Daowei, LV Xianjin, et al. Modeling and management of large power grid stability situation knowledge graph based on time-varying graph[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2023, 21(3): 1-9(in Chinese).
- [30] 王同文, 管霖, 张尧. 人工智能技术在电网稳定评估中的应用综述[J]. 电网技术, 2009, 33(12): 60-65, 71.
WANG Tongwen, GUAN Lin, ZHANG Yao. A survey on application of artificial intelligence technology in power system stability assessment[J]. Power System Technology, 2009, 33(12): 60-65, 71(in Chinese).
- [31] 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).
- [32] 李小双, 王晓, 杨林瑶, 等. 元电网 MetaGrid: 基于平行电网的新一代智能电网的体系与架构[J]. 智能科学与技术学报, 2021, 3(4): 387-398.
LI Xiaoshuang, WANG Xiao, YANG Linyao, et al. MetaGrid: a parallel grids based approach for next generation smart power systems [J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2021, 3(4): 387-398(in Chinese).
- [33] 方巍, 伏翔. 元宇宙: 概念、技术及应用研究综述[J]. 南京信息工程大学学报, 2024, 16(1): 30-45.
FANG Wei, FU Yuxiang. Metaverse: conceptions, key technologies and applications[J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology, 2024, 16(1): 30-45(in Chinese).
- [34] 李文正. 元宇宙和 Web3.0 的技术特征、关系及挑战[J]. 计算机仿真, 2023, 40(11): 7-10, 15.
LI Wenzheng. Technical characteristics, interrelationships and challenges between Metaverse and Web 3.0[J]. Computer Simulation, 2023, 40(11): 7-10, 15(in Chinese).
- [35] SHU Hongping, CAO Liang, XU Zhenming, et al. The research of multidimensional information decision mining based on information entropy[C]//Proceedings of 2009 International Forum on Information Technology and Applications. Chengdu, China: IEEE, 2009: 732-735.
- [36] 王伟. 基于突变理论的网络容忍入侵模型研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2009.
- [37] 曹一家, 陈彦如, 曹丽华, 等. 复杂系统理论在电力系统中的应用研究展望[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(19): 1-9.
CAO Yijia, CHEN Yanru, CAO Lihua, et al. Prospects of studies on application of complex system theory in power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(19): 1-9(in Chinese).
- [38] 陈志鹏, 谢宁, 王承民, 等. 基于分形机理的复杂电力网络脆弱性评估及鲁棒性提升策略研究[J]. 电网技术, 2021, 45(2): 657-664.
CHEN Zhipeng, XIE Ning, WANG Chengmin, et al. Vulnerability evaluation and robustness improvement strategy of complex power network based on fractal mechanism[J]. Power System Technology, 2021, 45(2): 657-664(in Chinese).
- [39] HOERL R, JENSEN W, DE MAST J. Understanding and addressing complexity in problem solving[J]. Quality Engineering, 2021, 33(4): 612-626.
- [40] ILIC M, JADDIVADA R. Unified value-based feedback, optimization and risk management in complex electric energy systems[J]. Optimization and Engineering, 2020, 21(2): 427-483.
- [41] 顾洁, 白凯峰, 时亚军. 基于多主体主从博弈优化交互机制的区域综合能源系统优化运行[J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3119-3129.
GU Jie, BAI Kaifeng, SHI Yajun. Optimized operation of regional integrated energy system based on multi-agent master-slave game optimization interaction mechanism[J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3119-3129(in Chinese).
- [42] 于群, 王琪, 曹娜. 基于异质元胞自动机的电网停电机理仿真模型[J]. 中国电力, 2019, 52(12): 79-89.
YU Qun, WANG Qi, CAO Na. Blackouts mechanism simulation model of power system based on heterogeneous cellular automata[J]. Electric Power, 2019, 52(12): 79-89(in Chinese).
- [43] 刘旭娜, 魏俊, 张文涛, 等. 基于信息熵和模糊分析法的配电网投资效益评估及决策[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(12): 48-56.
LIU Xuna, WEI Jun, ZHANG Wentao, et al. Investment benefits evaluation and decision for distribution network based on information entropy and fuzzy analysis method[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12): 48-56(in Chinese).
- [44] 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]. 中国电机工程学报, 2024, 44(11): 4311-4322.
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]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(11): 4311-4322(in Chinese).
- [45] 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).
- [46] 张斌, 冯广宇, 郭志诚, 等. 基于信息物理社会系统的数字电网技术架构[J]. 电力勘测设计, 2023(10): 53-59.
ZHANG Bin, FENG Guangyu, GUO Zhicheng, et al. Research on the technical architecture of digital power grid based on CPSS[J]. Electric Power Survey & Design, 2023(10): 53-59(in Chinese).
- [47] XUE Yusheng, YU Xinghuo. Beyond smart grid -cyber -physical-social system in energy future [point of view][J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(12): 2290-2292.
- [48] 程乐峰, 余涛, 张孝顺, 等. 信息-物理-社会融合的智慧能源调度机器人及其知识自动化: 框架、技术与挑战[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(1): 25-40.
CHENG Lefeng, YU Tao, ZHANG Xiaoshun, et al. Cyber-physical-social systems based smart energy robotic dispatcher and its knowledge automation: framework, techniques and challenges[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(1): 25-40(in Chinese).
- [49] 宋晓玲, 刘勇, 董景楠, 等. 元宇宙中区块链的应用与展望[J]. 网络与信息安全学报, 2022, 8(4): 45-65.

- SONG Xiaoling, LIU Yong, DONG Jingnan, et al. Application and prospect of blockchain in Metaverse[J]. Chinese Journal of Network and Information Security, 2022, 8(4): 45-65(in Chinese).
- [50] 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).
- [51] 范士雄, 郭剑波, 马士聪, 等. 混合增强智能在电力系统中的应用研究[J]. 电网技术, 2023, 47(10): 4081-4091.
- FAN Shixiong, GUO Jianbo, MA Shicong, et al. Application analysis and exploration of hybrid-augmented intelligence in power systems[J]. Power System Technology, 2023, 47(10): 4081-4091(in Chinese).
- [52] 孙永辉, 孟云帆, 葛磊蛟, 等. 人工智能赋能微电网运行优化的应用及展望[J]. 高电压技术, 2023, 49(6): 2239-2252.
- SUN Yonghui, MENG Yunfan, GE Leijiao, et al. Application and prospect of microgrid operation optimization enabled by artificial intelligence[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2239-2252(in Chinese).
- [53] 王书鸿, 郑少明, 刘中硕, 等. 面向某地区电网继电保护装置缺陷知识图谱构建的实体关系抽取[J]. 电网技术, 2023, 47(5): 1874-1885.
- WANG Shuhong, ZHENG Shaoming, LIU Zhongshuo, et al. Entity relation extraction for construction of relay protection device defect knowledge graph in some certain area power grid[J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 1874-1885(in Chinese).
- [54] 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.
- [55] 林楚. 《新型电力系统发展蓝皮书》发布制定新型电力系统“三步走”发展路径[N]. 机电商报, 2023-06-12(A06).



郭凌旭

在线出版日期: 2024-08-23。

收稿日期: 2024-05-15。

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;

孙宏斌(1969), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 国家级教学名师, 中组部万人计划科技领军人才, 教育部长江学者特聘教授, 国家杰出青年基金获得者, IEEE Fellow, IET Fellow, 国家百千万人才工程入选者, 国家有突出贡献中青年专家, 国务院特殊津贴专家。主要研究方向为能源互联网、智能电网、自动电压控制和电力系统信息论, E-mail: shb@tsinghua.edu.cn。

(责任编辑 徐梅)