

元宇宙在电力系统中的应用

周博文^{1,2}, 奚超^{1,2}, 李广地^{1,2}, 杨波^{1,2}

(1. 东北大学信息科学与工程学院, 辽宁省 沈阳市 110819;

2. 辽宁省综合能源优化与安全运行重点实验室(东北大学), 辽宁省 沈阳市 110819)

Metaverse Application in Power Systems

ZHOU Bowen^{1,2}, XI Chao^{1,2}, LI Guangdi^{1,2}, YANG Bo^{1,2}

(1. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning Province, China;

2. Key Laboratory of Integrated Energy Optimization and Secure Operation of Liaoning Province (Northeastern University), Shenyang 110819, Liaoning Province, China)

摘要: 元宇宙是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。随着“碳达峰、碳中和”目标与新型电力系统的提出,在元宇宙中建设电力系统是未来发展的趋势。针对元宇宙在电力系统的应用,通过数字孪生技术、物联网技术2种手段来认知元宇宙继而分析元宇宙中的电力系统。不同于现在的虚拟现实,元宇宙具备虚拟融生、多元化、沉浸感、经济系统和文明四大特点。围绕上述2种手段和四大特点,从科学和工程视角介绍元宇宙,阐述其中电力系统的框架及其可以实现的功能。最后,介绍了元宇宙在电力系统的潜在应用与前景。

关键词: 元宇宙; 新型电力系统; 数字孪生; 物联网

ABSTRACT: Metaverse is a new internet application and social form of virtual reality integration which is produced by integrating a variety of new technologies. With the goal of “carbon peak and carbon neutrality” and the proposal of new power system, the construction of power system in metaverse is the trend in the future. Considering the application of metaverse applications in power systems, this paper used digital twin technology and internet-of-things technology to understand the metaverse, and then analyzed the power systems in the metaverse. Different from the current virtual reality, the metaverse has four characteristics: virtual fusion, diversification, immersion, economic system and civilization. Focusing on the above two means and four characteristics,

this paper introduced the metaverse from the perspective of science and engineering, and expounded the framework and functions of power systems. Finally, this paper discussed the potential applications and prospects of metaverse in power systems.

KEY WORDS: metaverse; new power system; digital twin; internet-of-things

0 引言

现阶段,互联网技术面临的主要问题是平台形态趋于内卷化,在载体内容、交互传播、参与互动等方面长期停滞不前,导致“没有发展的增长”^[1]。在新冠疫情隔离政策下,全世界上网时间大量增加,“宅经济”迅速发展,大多数人将线下生活状态转变为线上生活状态,将虚拟世界演变成了现实世界的平行世界,线上与线下打通,人们逐渐开始从现实世界向虚拟世界迁移。当前技术渴望生产出高质量的产品,资本家探索新贸易模式,用户期待全新的体验。元宇宙就好比是现实世界与虚拟世界虚实相融的互联网,在元宇宙中,人们不再去对相关内容进行浏览,自身本就处在各种内容之中^[2]。从互联网进化到移动互联网,元宇宙将会在移动互联网后迎来一个全新的时代^[3]。

近年来,各大互联网公司围绕互联网虚拟世界开展了大量研究。2021年7月27日,脸书(Facebook)公司成立了元宇宙团队,并且将公司的

基金项目: 国家自然科学基金项目(61703081); 中央高校基本科研业务费(N2104014); 新能源电力系统国家重点实验室开放课题(LAPS21007)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (61703081); Fundamental Research Funds for the Central Universities (N2104014); Open Project of State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (LAPS21007).

名字改为“元(Meta)”。Epic公司开发的《堡垒之夜》虚拟世界游戏是目前较为公认的元宇宙雏形产品。百度依托众多先进的人工智能技术,借助虚拟现实交互平台,降低了元宇宙世界的成本^[4]。元宇宙的本质是将现实世界进行数字化、虚拟化,元宇宙将成为虚拟世界与现实世界共存的第二空间^[5]。元宇宙的发展是循序渐进的,在相应的设施和技术条件下,由众多行业、平台不断融合、进化而最终成形^[6]。在元宇宙不断发展的过程中,也将遇到很多新问题,需要进一步进行完善。在虚拟空间与现实空间融生之后,还要关注技术发展所带来的社会变革,保障各种行业健康有序发展^[7]。

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,新型电力系统需要大量的数字化仿真建模分析,将在元宇宙中呈现现实设备与数字化设备的高度融合。元宇宙电力系统能够为新型电力系统建模、稳定分析、运行控制提供技术支撑,因此元宇宙提供了沉浸式仿真的有效工具,对实现双碳目标具有重要的意义^[8]。

本文介绍了元宇宙的诞生、定义、发展过程、发展趋势,元宇宙电力系统的实体反馈、优化调度、运行控制、故障诊断、动态仿真,以及人与元宇宙电力系统的动态交互,并结合当前的发展方向与研究热点,提出了元宇宙中电力系统的短期应用与长期应用。

1 元宇宙的概述

1992年,Neal Stephenson在科幻小说《Snow Crash》中第一次提到了“Metaverse(元宇宙)”这个概念^[9],元宇宙是一种很大程度上会实现的未来。

元宇宙是一种将虚拟与现实相结合的新型互联网应用和社会形态,它基于扩展现实技术提供沉浸式体验,基于数字孪生技术生成现实世界的镜像,基于区块链技术构建经济体系,将虚拟世界与现实世界全方位、多角度整合,并允许每个用户对其进行创造与编辑^[10]。元宇宙技术的基本概念如图1所示。

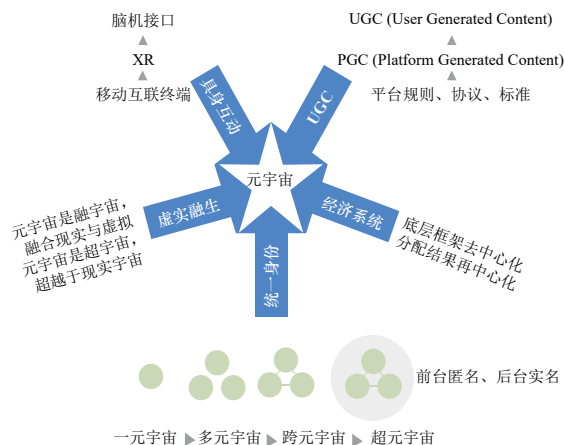


图1 元宇宙技术

Fig. 1 Metaverse technology

元宇宙这一概念在不断发展、进化,每个用户都在参与过程中不断丰富并完善其含义^[11-12]。2021年是元宇宙元年,互联网迭代升级的大幕就此拉开^[13]。在元宇宙时代,“万物互联”将逐步走向“万物互信”,再到“万物交易”和“万物协作”^[14-15]。集中的互联网机构盗用、滥用数据的模式将结束,并被一种充分实现数据权益保护的新经济体制所取代。元宇宙时代也将是数字文化大变革、大发展、大主流的时代。元宇宙的四大趋势如图2所示。

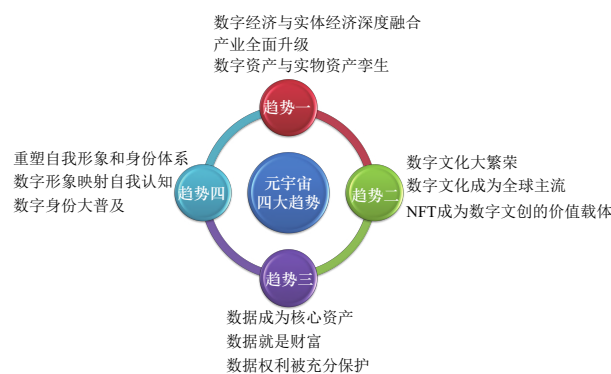


图2 元宇宙四大趋势

Fig. 2 Four major trends of metaverse

2 元宇宙电力系统

2.1 元宇宙电力系统架构

元宇宙自诞生以来就与电力系统领域紧密耦合。现阶段,电力系统正处于转型升级的开始阶段,电网运行信息、电力企业运营信息都在从实体到数字化升级,电力系统的物理载体和运营主

体都在发生着数字化的变革,为融入元宇宙奠定了基础。开创电力系统与元宇宙相关新概念、新技术、新应用融合发展,是电力系统转型的重要步骤^[16-17]。图3为元宇宙电力系统的基本架构。

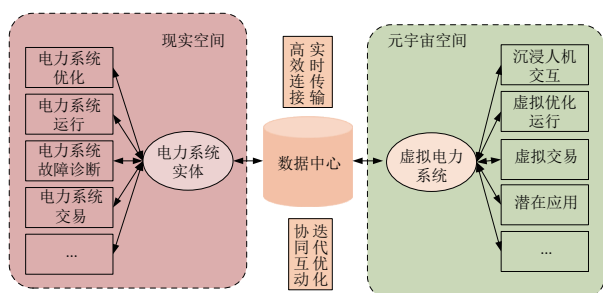


图3 元宇宙电力系统架构图

Fig. 3 Framework of power systems in metaverse

目前,元宇宙电力系统的发展还面临着两大难题:一是目前的网络支撑技术、双向传输速度均不能满足庞大电力系统数据的实时传输需求;二是智能终端及电力设备结构复杂,相关技术有待提升^[18]。在元宇宙时代来临之际,电力系统可提前在虚拟端打下坚实的基础,在很大程度上使电力系统更加安全稳定地运行,促进元宇宙中电力系统的发展。

2.2 元宇宙电力系统数据中心

综合全面地分析元宇宙电力系统是电网安全稳定运行的基础,对元宇宙中电力系统优化、稳定运行、实体反馈、故障诊断等方面具有重要的意义。

元宇宙电力系统同步规划电力系统物理实体与元宇宙虚拟空间,从数据构建出发,生成动态综合数据中心^[19];同时,在实体运行时不断向元宇宙空间导入规划、优化、仿真、故障诊断等相关模型与运行数据,以及人在元宇宙中不同视角下的操作记录、培训记录、录像回放等数据,从而不断完善数据中心;在稳定运行阶段,依托智能分析管理平台,实现对元宇宙中电力系统的决策支撑和优化管理^[20]。

通过数字化建模和建设虚拟设施,将电力信息纳入到元宇宙电力系统体系中,通过智能感知和数据采集补充完善数据中心。元宇宙中电力系统数据中心与现实中电力系统数据中心存在很大差异,数据形态、异构类型、关联关系都将更加

复杂。同时,元宇宙中各类角色、形象(avatar)的参与将大大增加数据的可变性与交互性,用户角色的实时互动所引起的个性化、定制化数据增量对元宇宙数据中心提出更高要求。数据库利用中心化存储可以使存储数据稳定可靠^[21],利用区块链技术对数据库进行监督,增加了可信性^[22],工人了解电力系统运行态势的手段越来越多样化,获取信息的方式越来越简单,获得的信息越来越丰富,人机交互的界面也越来越友好^[23],为系统未来态势预测、历史数据查询、数据可信性等研究领域研究提供数据支撑。

2.3 元宇宙电力系统实体反馈

元宇宙虚拟空间与实体电力系统通过高效连接和实时传输实现虚实融生。通过智能感知技术和数据中心信息采集技术实现“由实入虚”;电力系统物理实体和元宇宙虚拟空间通过实体反馈实现虚实融生,并通过实时优化运行控制实现“由虚馈实”^[24]。

电力设备实体和元宇宙空间双向映射、动态交互、实时连接,元宇宙中电力系统计算实时数据更新模型,再将数据模型中校正计算后的电力参数回传给实体控制设备,从而实现对实体设备的精确控制。

通过虚拟空间将运行状态传递给实体电力系统,一方面可以作为稳定运行数据存储在数据中心进行分析优化;另一方面可以对电网可能遇到的问题进行预演,将元宇宙电力系统中存在的相关技术、运行问题反馈到实体电力系统,并制定相应对策^[25]。

2.4 元宇宙电力系统优化调度

在优化运行方面,对于电网的核心数据,在元宇宙电力系统中基于预先实例化的数据预处理、多类数据聚集的优化计算、动态数据在线聚合并等技术,实现快速解析数据中心^[26]。

通过建立元宇宙中各电力设备的调度策略和信息处理策略,实现元宇宙中虚拟电力系统灵活优化调度,从而实现现实中电力系统更高效、更智能、更安全运行^[27]。将电力系统设备参与元宇宙系统的运行调度与现实系统运行调度进行对比,并考虑在虚拟电力系统中加入实时的需求响应,

可实现虚实融生下电力系统经济性、环境性、安全性3个方面不同程度的优化^[28]。在完全虚拟的场景中,可以同时得到多种调度策略的可视化与可互动结果,对调度运行人员实现优化调度将具有更生动的直观体验。

2.5 元宇宙电力系统运行控制

元宇宙电力系统是多源数据整合、多种技术集成和分层控制的,面向元宇宙智能电网的复杂技术和应用体系,通过元宇宙电力系统和现实电力系统的结合,有效支撑电网虚实融生化。

元宇宙电力系统的结构由控制层、区域电网层、设备层、应用层组成。其中:控制层根据电力系统管理平台,负责审核电力系统的运行方案、响应信息等;区域电网层中各区域电力系统之间通过集中式控制方式控制运行,使设备可通过其他因素优化调度电能;设备层包含各种电力设备、虚拟电力设备;应用层包含多个虚拟和实体工厂、居民区、能源站、数据中心等^[29-30]。元宇宙电力系统运行如图4所示。

电力交易平台根据优化结果进行交易,将控

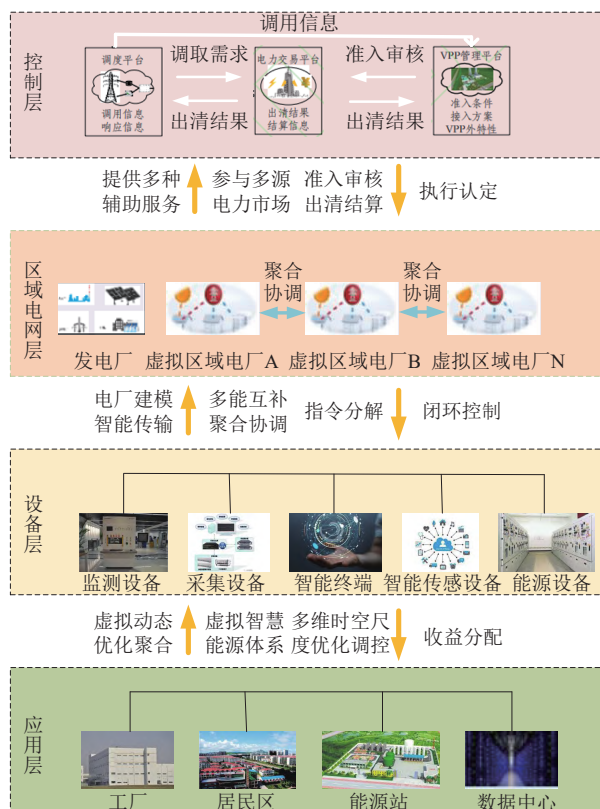


图4 元宇宙电力系统运行图

Fig. 4 Power system operation in metaverse

制结果发送到控制层进行分析,控制系统下发控制需求至电力系统管理平台,电力系统管理平台将控制指令进一步分解到用户层和应用层,实现闭环控制^[31-33]。

2.6 元宇宙电力系统智能巡检与故障诊断

元宇宙电力系统需要对其数据信息、运行状态等进行实时监测。通过有线设备和无线设备的结合,可以实现在各种场景下电力设备状态数据的采集与检测^[34-36];通过智能巡检平台实现监测全自动、智能化巡检,结合电力系统优化模块,逐步实现典型故障、显著隐患的智能识别,通过数据采集、积累和人工智能学习训练,逐步实现故障分析等功能,提高对数据的分析处理能力,实现巡检智能化。

在元宇宙电力系统中,通过智能采集设备,利用感知控制技术获得电力系统的实时信息,利用光纤通信技术和无线传感技术,实时掌握电力系统和各种电气设备的运行信息,确保电力系统实体的全部数据能安全准确地传输到元宇宙电力系统,从而减少外部因素对电网的影响^[37-38]。

2.7 电力系统动态仿真

当前电力系统过渡到新型电力系统的进程中,仿真技术发挥着关键作用。由于电力系统的发电、输电、配电、变电、用电具有连续性和多样性,需要采用数字仿真软件来对其动态特性进行仿真。现阶段仿真的侧重点是电力系统级的仿真,而随着电力电子技术的发展,从电力器件级到电力设备装置级再到电力系统级的仿真是未来发展的趋势,并且电网严重故障仿真等仿真需求无法通过实体电力设备来实现^[39],而在元宇宙电力系统中可以很好地解决这一问题。

新型电力系统中包含大量电力电子器件,电力电子系统中功率开关等相关器件的响应时间低于微秒级,电路拓扑的响应时间一般为毫秒级^[40-41],系统动态仿真是毫秒级电磁暂态过程与秒级机电暂态过程的耦合。现在的电力系统仿真很难满足如此高维度变量大规模仿真的需要,而在元宇宙中通过数字化仿真,可以有效并快速分析诊断此类问题。因此,通过元宇宙电力系统对其进行虚拟快速动态仿真,得到相应的仿真结果并

反馈到实体电力系统,可以使电力系统面对相应情况时进行及时应对。

2.8 人与元宇宙电力系统交互

人与电力系统交互的纽带是信息,电力系统虽然可以从各种物理环境中获取并存储信息,但无法对信息进行主观评价^[42]。但人可以在更高层次感知信息,并提取有价值信息,从而在人与电力系统交互过程中利用主观信息对设备进行控制,使设备在安全稳定运行时体现人的真实意图和智能属性。元宇宙能够很好地模拟人在实际电力系统运行中的操作和行为,可以分析“人在回路”的电力系统运行控制,发现人的某些特定行为对系统安全性、稳定性、可靠性等的影响,从而实现人与电力系统的沉浸式交互。

目前,电力系统频率调节不稳定问题越来越突出^[43],传统的人工参与电力系统巡检过程基本上取决于人的主动性,这种巡检方式存在工作人员记录方式、维护管理以及工作量等问题,并且不当操作可能对工作人员和电力系统造成巨大的破坏^[44]。因此,要对工人进行沉浸式培训。在新物联网技术高速发展的背景下,虚拟电力系统所提出的虚实融生、沉浸式体验的特点有助于科研人员对电力系统进行重新认识,从而更好地实现电力系统运行与控制;并且可以使工人通过虚拟环境操作,间接完成现实中对实体设备的危险操作,既减轻了干扰,又增加了工作效率,同时保障了工人的安全^[45-49]。

在元宇宙电力系统中,随着虚拟电力系统智能性的提高,人与电力系统关系则会演变为共生关系,人与元宇宙电力系统虚实交融,形成以人为中心的智能化电力系统形态,在稳定运行、智能优化、故障诊断等方面提供更精准的智慧化建设^[50]。通过人与电力系统的全面融生,推动了其他行业体系的构建。

3 元宇宙中电力系统的潜在应用与前景

电力系统与元宇宙中各个领域有着紧密的联系,在元宇宙系统中发挥着重要的作用,并且在其他领域有很多潜在应用。

3.1 元宇宙中电力系统的短期应用

元宇宙电力系统建设目的在于进一步促进电力系统的高效运行,使电力供应更科学、更有效、更稳定,促进电力系统的健康稳定发展,降低电力系统运行维护成本,为社会各领域的健康发展提供基本保障。

在短期内基于物联网技术,实现海量数据的深度挖掘与同步分析,使数据全面接入,实现跨专业数据互通,打破专业数据壁垒,最终将电力数据在各行各业应用,形成各种行业广泛参与的运营模式^[51]。在电力系统规划、电网运行管理、智能巡检与故障诊断、电力交易等各业务环节实现一体化发展,并对长短期规划进行预测分析,实现虚拟电力系统状态自我感知、电力设备协调运行、客户服务全新体验的全价值链协同模式,保证虚拟电力系统整体的优化配置^[52-54]。

3.2 元宇宙中电力系统的中长期应用

在建设元宇宙电力系统的过程中,坚持其共享特性,注重将其与互联网经济连接,有效指导数字化转型,对其进行综合建设,形成更佳的电力发展效果,并促进各行各业经济的协调发展。在中长期,虚拟电力系统指导新型电力系统数字化升级、智能化应用,促进源网互动,构建开放式的电力市场,加快低碳发展,实现“碳达峰、碳中和”目标。按照国家政策,采取合乎市场规律的商业模式,鼓励用户在智能交易平台进行交易互动操作,为其提供更优质服务以拓宽各行业渠道^[55]。元宇宙电力系统以业务需求为导向进行建模,同时还根据业务流程在电力系统基础上构建其他相关应用以形成虚拟化的业务链,并从企业运行和管理等多个角度提供指导,最终实现电网全价值链协同^[56]。

4 结论

元宇宙的概念在信息化、数字化浪潮的推动下飞速传播,为电力系统提供了潜在的价值。聚焦元宇宙电力系统,介绍了元宇宙的概念和发展趋势,并提出了元宇宙在电力系统的应用前景。未来,元宇宙电力系统将有效提升电力系统的发

电、输电、配电、变电、用电能力, 提高电网信息采集、感知、处理、应用各环节的虚实交融化、智能化能力, 为推动电网向能源互联网过渡、助力构建元宇宙电力系统、推动实现双碳目标提供关键技术支撑。

参考文献

- [1] 李晓翠, 李颖. 后疫情时代“宅经济”可持续发展对策研究[J]. 全国流通经济, 2020(29): 9-11.
LI X C, LI Y. Study on the sustainable development countermeasures of “house economy” in the post epidemic era[J]. National Circulation Economy, 2020 (29): 9-11.
- [2] ZHANG N, ZHAO N, QU Y. Research on the integration system of ubiquitous power internet of things based on blockchain technology[C]//2020 International Conference on Robots & Intelligent System (ICRIS). Sanya, China: IEEE, 2020: 356-359.
- [3] CHETTRI L, BERA R. A comprehensive survey on internet of things (IoT) toward 5G wireless systems[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(1): 16-32.
- [4] 吴可心, 李正民, 张兆心, 等. 云平台虚拟化性能的评测与研究[J]. 高技术通讯, 2016, 26(12): 960-968.
WU K X, LI Z M, ZHANG Z X, et al. Evaluation and research on virtualization performance of cloud platform[J]. Chinese High Technology Letters, 2016, 26(12): 960-968.
- [5] 胡喆. 什么是元宇宙? 为何要关注它?: 解码元宇宙[EB/OL]. (2021-11-19) [2021-12-31]. <https://finance.sina.com.cn/tech/2021-11-19/doc-iktzscyy6589015.shtml>.
HU Z. What is the meta-universe? care? Why: decodes the metaverse[EB/OL]. (2021-11-19) [2021-12-31]. <https://finance.sina.com.cn/tech/2021-11-19/doc-iktzscyy6589015.shtml>.
- [6] 方凌智, 沈煌南. 技术和文明的变迁: 元宇宙的概念研究[J/OL]. 产业经济评论, 2022(1): 1-14[2021-12-23]. DOI: 10.19313/j.cnki.cn10-1223/f.20211206.001.
FANG L Z, SHEN H N. Changes in technology and civilization: a conceptual study of the meta universe [J/OL]. Industrial Economy Review, 2022(1): 1-14 [2021-12-23]. DOI: 10.19313/j.cnki.cn10-1223/f.2021 1206.001.
- [7] KILTENI K, GROTEN R, SLATER M, et al. The sense of embodiment in virtual reality[J]. Presence, 2012, 21(4): 373-387.
- [8] 申洪, 周勤勇, 刘耀, 等. 碳中和背景下全球能源互联网构建的关键技术及展望[J]. 发电技术, 2021, 42(1): 8-19.
SHEN H, ZHOU Q Y, LIU Y, et al. Key technologies and prospects of global energy internet construction in the context of carbon neutrality[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(1): 8-19.
- [9] STEPHENSON N. Snow crash[M]. London: RoC (Pengiun), 1993.
- [10] 喻国明, 耿晓梦. 何以“元宇宙”: 媒介化社会的未来生态图景[J/OL]. 新疆师范大学学报(哲学社会科学版): 1-8[2021-12-31]. DOI: 10.14100/j.cnki.65-1039/g4.20211119.002.
YU G M, GENG X M. Why “meta universe”: the future ecological picture of media society[J/OL]. Journal of Xinjiang Normal University (Philosophy and Social Sciences Edition): 1-8[2021-12-31]. DOI: 10. 14100/j.cnki.65-1039/g4.20211119.002.
- [11] HUGHES L, DWIVEDI Y K, MISRA S K, et al. Blockchain research, practice and policy: applications, benefits, limitations, emerging research themes and research agenda[J]. International Journal of Information Management, 2019, 49: 114-129.
- [12] DAVID J, DIONISIO N, WILLIAM G, et al. 3D virtual worlds and the metaverse[J]. ACM Computing Surveys (CSUR), 2013, 45(3): 1-38.
- [13] 于佳宁, 何超. 如何理解元宇宙? [EB/OL]. (2021-12-12) [2021-12-31]. <https://www.163.com/dy/article/GR1494GN0521CI3B.html>.
YU J N, HE C. How to understand the metaverse? [EB/OL]. (2021-12-12)[2021-12-31]. <https://www.163.com/dy/article/GR1494GN0521CI3B.html>.
- [14] 于佳宁, 何超. 元宇宙: 开启未来世界的六大趋势[M]. 北京: 中信出版集团, 2021.
YU J N, HE C. Metauniverse: six trends to open the future world [M]. Beijing: CITIC Press Group, 2021.
- [15] 肖白, 周文凯, 姜卓, 等. 泛在电力物联网研究现状分析[J]. 发电技术, 2020, 41(1): 88-93.
XIAO B, ZHOU W K, JIANG Z, et al. Analysis on the research status of ubiquitous power Internet of things [J]. Power Generation Technology, 2020, 41(1): 88-93.
- [16] LI S X, YUE H, YUE Y L, et al. Power mechanism and strategy of digital transformation in power grid industry: take State Grid Jibei Electric Power Company Limited as an example[C]//2020 International Conference on Computer Science and Management Technology (ICCSMT). IEEE, 2020: 340-345.
- [17] 孙珂, 杨丽坡, 李江涛. 构建新型电力系统统筹低碳

- 安全保供[N]. 国家电网报, 2021-12-14(005).
- SUN K, YANG L P, LI J T, Building a new power system and coordinating low-carbon safe supply[N]. State Grid News, 2021-12-14(005).
- [18] LIANG X L, SUN D L, LI W S. Composition form and function configuration of intelligent terminal based on edge computing for power internet of things[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 621(1): 012058.
- [19] RAVIKUMAR G, KHAPARDE S A. A common information model oriented graph database framework for power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 4(32): 2560-2569.
- [20] LIU Q, LENG J W, YAN D X, et al. Digital twin-based designing of the configuration, motion, control, and optimization model of a flow-type smart manufacturing system[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2021, 58: 52-64.
- [21] WANG Q, BU S Q, HE Z Y, et al. Toward the prediction level of situation awareness for electric power systems using CNN-LSTM network[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 10(17): 6951-6961.
- [22] ZHOU L, VARADHARAJAN V, HITCHENS M. Achieving secure role-based access control on encrypted data in cloud storage[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2013, 8(12): 1947-1960.
- [23] LIANG G Q, WELLER S R, LUO F J. Distributed blockchain-based data protection framework for modern power systems against cyber attacks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 3(10): 3162-3173.
- [24] 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/OL]. 中国电机工程学报: 1-13[2021-12-31]. DOI: 10.13334/j.0258-8013.psee.211977.
- ZHAO P, PU T J, WANG Y X, et al. Key technologies and prospects of power Internet of things facing the digital twin of energy internet[J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-13[2021-12-31]. DOI: 10.13334/j.0258-8013.psee.211977.
- [25] DÖRFLER F. Online feedback optimization with applications to power systems[C]//2020 European Control Conference (ECC). Saint Petersburg, Russia: IMTO University, 2020: 1552-1552.
- [26] YANG H, BAI Y, ZOU Z, et al. Research on data security sharing mechanism of power internet of things based on blockchain[C]//2020 IEEE 9th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC). IEEE, 2020: 2029-2032.
- [27] XIONG H Q, HUANG Y H, DAI F, et al. Key technology and engineering application of pre decision system of quasi online dispatching control for massive power grid analysis: quasi online navigation system for power system operation[C]//2021 3rd Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES). Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021: 523-534.
- [28] 王永利, 董焕然, 齐成元, 等. 泛在电力物联网优化与调控方法研究[J]. 电力需求侧管理, 2019, 21(6): 8-13.
- WANG Y L, DONG H R, QI C Y, et al. Research on optimization and regulation method of ubiquitous power internet of things[J]. Power Demand Side Management, 2019, 21(6): 8-13.
- [29] 赵昊天, 王彬, 潘昭光, 等. 支撑云-群-端协同调度的多能园区虚拟电厂: 研发与应用[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(5): 111-121.
- ZHAO H T, WANG B, PAN Z G, et al. Research and application of park-level multi-energy virtual power plants supporting cloud-cluster-end multi-level synergetic dispatch[J]. Automation of Electric Power System, 2021, 45(5): 111-121.
- [30] ZHANG G, HUO C, ZHENG L, et al. An architecture based on digital twins for smart power distribution system[C]//2020 3rd International Conference on Artificial Intelligence and Big Data (ICAIBD). Chengdu, China: IEEE, 2020: 29-33.
- [31] 严兴煜, 高赐威, 陈涛, 等. 数字孪生虚拟电厂系统框架设计及其实践展望[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-17[2021-12-31]. DOI: 10.13334/j.0258-8013.psee.212378.
- YAN X Y, GAO C W, CHEN T, et al. System framework design and practice prospect of digital twin virtual power plant[J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-17[2021-12-31]. DOI: 10.13334/j.0258-8013.psee.212378.
- [32] LUO Y H, ZHANG X W, YANG D S, et al. Emission trading based optimal scheduling strategy of energy hub with energy storage and integrated electric vehicles[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2020, 8(2): 267-275.
- [33] WANG Y C, ZHU B P, ZHANG H G, et al. Functional observer-based finite-time adaptive ISMC for continuous systems with unknown nonlinear function[J].

- Automatica, 2021, 125: 109468.
- [34] NASRUN M, NASIR M, SABO A, et al. A review on synchrophasor technology for power system monitoring[C]//2019 IEEE Student Conference on Research and Development (SCORED). Bandar Seri Iskandar, Malaysia: IEEE, 2019: 58-62.
- [35] 彭超逸, 张昆, 胡亚平, 等. 动态监测系统在电力市场环境下的应用[J]. 发电技术, 2021, 42(5): 595-603.
- PENG C Y, ZHANG K, HU Y P, et al. Application of dynamic monitoring system in power market environment[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(5): 595-603.
- [36] YANG D S, SUN Y H, WEI Q L, et al. Topology prediction and structural controllability analysis of complex networks without connection information[J]. IEEE Transactions on Systems, 2021, 12: 1-13.
- [37] TIAN Y, PANG Z J, WANG W B, et al. Substation sensing monitoring system based on power Internet of Things[C]//2017 IEEE 2nd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC). Chengdu, China: IEEE, 2017: 1613-1617.
- [38] CHENG Y F, LU C, MEN K, et al. Research on perception of power system state based on WAMS[C]//2015 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT). Washington, DC, USA: IEEE, 2015: 1-5.
- [39] TÎRNOVAN R, CRISTEA M. Advanced techniques for fault detection and classification in electrical power transmission systems: an overview[C]//2019 8th International Conference on Modern Power Systems (MPS). Cluj-Napoca, Cluj, Romania: IEEE, 2019: 1-10.
- [40] 杭丽君, 闫东, 胡家兵, 等. 电力电子系统建模关键技术综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(9): 2966-2980.
- HANG L J, YAN D, HU J B, et al. Overview and prospect of key technologies of power electronic system modeling[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(9): 2966-2980.
- [41] WANG K P, QI Z Y, LI F, et al. Review of state-of-the-art integration technologies in power electronic systems[J]. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 2017, 4(2): 292-305.
- [42] 黄安子. 电力人工智能开放平台关键技术研究及应用[J]. 自动化与仪器仪表, 2020(5): 189-192.
- HUANG A Z. Research and application of key technologies of power artificial intelligence open platform[J]. Automation and Instrumentation, 2020(5): 189-192.
- [43] YAN W H, CHENG L, YAN S J, et al. Enabling and evaluation of inertial control for PMSG-WTG using synchronverter with multiple virtual rotating masses in microgrid[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(2): 1078-1088.
- [44] 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.
- MIU W W, WU H Y, YU B H, et al. Study on the automatic inspection of power communication equipment based on state perception[J]. Wireless Internet Technology, 2018, 15(22): 7-10.
- [45] BROSINSKY C, WESTERMANN D, KREBS R. Recent and prospective developments in power system control centers: adapting the digital twin technology for application in power system control centers[C]//2018 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON). Limassol, Cyprus: IEEE, 2018: 1-6.
- [46] SAAD A, FADDEL S, YOUSSEF T, et al. On the implementation of IoT-based digital twin for networked microgrids resiliency against cyber attacks [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(6): 5138-5150.
- [47] 沈沉, 曹仟妮, 贾孟硕, 等. 电力系统数字孪生的概念、特点及应用展望[J/OL]. 中国电机工程学报, 2021: 1-14[2021-12-31]. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.211594.
- SHEN C, CAO Q N, JIA M S, et al. Concept, characteristics and application prospect of digital twinning in power system[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2021: 1-14[2021-12-31]. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.211594.
- [48] YU Q G, JI Z C, HE Z Y, et al. Design and accomplishment of immersive virtual reality in safety training of offshore oil platform power system[C]//The 16th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2020). 2020: 1904-1909.
- [49] QIU X J, WANG Y C, ZHANG H G, et al. Resilient model free adaptive distributed LFC for multi-area power systems against jamming attacks[J]. IEEE Transaction on Neural Networks and Learning Systems, 2021, 11: 1-10.
- [50] 孙世芳. 人机物三元融合万物智能互联[N]. 经济日报, 2021-12-04(010).

- SUN S F. Man machine object ternary integration and intelligent interconnection of all things[N]. Economic Daily, 2021-12-04(010).
- [51] 杨东升, 王道浩, 周博文, 等. 泛在电力物联网的关键技术与应用前景[J]. 发电技术, 2019, 40(2): 107-114.
- YANG D S, WANG D H, ZHOU B W, et al. Key technologies and application prospects of ubiquitous power internet of things[J]. Power Generation Technology, 2019, 40(2): 107-114.
- [52] Mohammadi M H. A survey on new trends of digital twin technology for power systems[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2021, 41(2): 3873-3893.
- [53] BEDI G, VENAYAGAMOORTHY G K, SINGH R, et al. Review of internet of things (IoT) in electric power and energy systems[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(2): 847-870.
- [54] 相晨萌, 曾四鸣, 闫鹏, 等. 数字孪生技术在电网运行中的典型应用与展望[J]. 高电压技术, 2021, 47(5): 1564-1575.
- XIANG C M, ZENG S M, YAN P, et al. Typical application and Prospect of digital twin technology in power grid operation[J]. High Voltage Technology, 2021, 47(5): 1564-1575.
- [55] 玉新. 电力物联网的关键技术与应用前景分析[J]. 科技创新与应用, 2020(32): 146-147.
- YU X. Analysis on key technologies and application prospects of power Internet of things[J]. Technological Innovation and Application, 2020(32): 146-147.
- [56] 彭婷婷. 元宇宙为产业发展带来更多想象空间[J]. 中国商界, 2021(12): 46-49.
- PENG T T. Metaverse brings more imagination for

industrial development[J]. Chinese Business, 2021(12): 46-49.

收稿日期: 2022-01-03.

作者简介:



周博文

周博文(1987), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力与能源系统运行与控制、电动汽车与电网互动、储能与需求响应、人工智能和能源互联网, zhoubowen@ise.neu.edu.cn;



奚超

奚超(1997), 男, 硕士研究生, 研究方向为电动汽车与电网互动、综合能源优化, 2225996488@qq.com;



李广地

李广地(1989), 男, 博士, 讲师, 研究方向为新能源并网发电、高频软开关技术, liguangdi@mail.neu.edu.cn;



杨波

杨波(1976), 男, 高级工程师, 研究方向为新能源、物联网、电气控制和电力通信, yangbo@ise.neu.edu.cn.

(责任编辑 尚彩娟)