

元宇宙发展背景下的新型电力系统配电网建设启示

文/刘冠言 顾媛媛 高翔
国网鞍山供电公司

通过梳理当前元宇宙发展可行的关键路径和发展形态，剖析元宇宙应用场景中的能源需求、典型场景和市场机制，得出新型电力系统配电网规划建设、运行维护和应急保障等方面的建设要点，以期为“双碳”目标下的能源互联网建设提供有益参考。

2021年是元宇宙发展的元年。同年，美国Facebook公司将母公司更名为Meta。目前仅国内注册的与元宇宙相关的公司的数量已经超过700家。经过一段时间的验证和发展，物联网、5G、VR、云计算、AI和区块链等新兴技术，需要一个更具规模的产业形态，元宇宙既是新技术的集大成者，也是产品落地的最新尝试。

元宇宙吸引了越来越多主体的关注和参与：中国移动设立元宇宙产业研究委员会，并已吸收第三批企业参与共同研究；2021年12月，上海市经济和信息化委员会印发的《上海市电子信息产业发展“十四五”规划》中提到：要前瞻部署量子计算、第三代半导体、6G通信和元宇宙等领域；最接近当前元宇宙定义的游戏《堡垒之夜》已经举办了10万人同时参与的虚拟世界演唱会。目前业界对于元宇宙定义还没有形成广泛共识，但受到极度关注的身份系统和价值系统是进行元宇宙探讨、搭建、发展的两个基本维度。可以预计，支撑两大系统的跨区域数据中心、可靠的5G网络覆盖、支持头戴式显示设备的强大边缘计算及类似同质化代币（NFT）的虚拟资产确权，对于电力系统的要求早已超越“电压、波形稳定”的传统范畴，而且具有在源端低碳环保、网端动态灵活、荷端泛在高效和储端经济可靠的特征。新型电力系统由于进一步融合了信

息系统与电力系统，智能化、数据化和自愈性将呈现高水准提升，基本能够满足元宇宙对于“源网荷储”的多样化需求。但由于元宇宙尚处于发展早期，新型电力系统规划、建设和运维需要保留足够裕度，进而保障与元宇宙类型相似和大规模持续用能、泛在高响应接入应用的部署和运营。新型电力系统“源网荷储”典型特征如图1所示。

在新型电力系统建设领域，江秀臣等从输变电数字化转型方向探索变电站、架空输电线路、电缆隧道和GIL等场景的规划思路，探讨了芯片化多物理量融合集成的精准感知技术、高保真动态多维数字孪生的状态异常预警技术等的应用前景。在新型电力系统应用架构领域，王秀强从实现“双碳”目标出发，梳理了发电侧、电网侧和负荷侧的新业态布局，形成“源网荷储”应对高比例新能源和高比例电力电子设备接入的综合策略构想。在新型电力系统应用领域，周博文等通过设计运用数字孪生技术和物联网技术的元宇宙电力系统，展望具备虚拟融合、多元化、沉浸感、经济系统和文明为主要特征的元宇宙电力系统的潜在应用前景。

如同诞生于元宇宙之前的云计算尚无统一的定义一样，元宇宙的建设还处于探索和验证的初级阶段，元宇宙的虚拟身份系统和价值认证系统建设需要在满足“双碳”要求的前提下进行。同时AR、



图1 新型电力系统“源网荷储”典型特征

VR等随时随地的虚拟场景接入、大量的算力支撑和可靠的网络连接对于电力提出多维度的要求，已经完全不是传统配电网从变电站到变台再到线路的电能量路径模式可以承载，而是需要主动配电网和5G等信息网络的进一步融合才能实现。考虑到能源互联网的建设进程，元宇宙的能源需求既需要实现电能与冷、热、生物质等多种能源的深度耦合和统一调度，也需要在实施运行中保证能源接入的安全性、便捷性和环保性，以保证实现现实世界和虚拟世界低碳价值观的一致性。

从元宇宙的能源需求和信息支撑两个关键特征出发，探索新型电力系统在应对此类新型负荷所需要提升的规划建设、运行维护、应急保障等综合能力，结合能源互联网和主动配电网技术特征，提出对于我国构建新型配电网系统的启示。

元宇宙相关研究

1. 元宇宙框架梳理

首先是概念框架。元宇宙最初的概念表述来自20世纪90年代的科幻小说《雪崩》，英文为Metaverse。一种被元宇宙业内人士引用的表述为：元宇宙是生物（主要是人）以数字身份参与和生活的数字世界。这是元宇宙从0到1的开始。与同样处于发展早期的Web3.0不同，元宇宙并非互联网的范式升级，至少元宇宙中的身份可以是多种多样的。这是元宇宙从1到N的演化。同时，进入元宇宙的个体都可以平等地参与元宇宙建设，置身其中的体验与面对手机或者计算机屏幕是完全不同的。元宇宙的架构如图2所示。

其次是技术逻辑。身份系统和价值系统的构建有赖于区块链技术支持，在保证去中心化的同

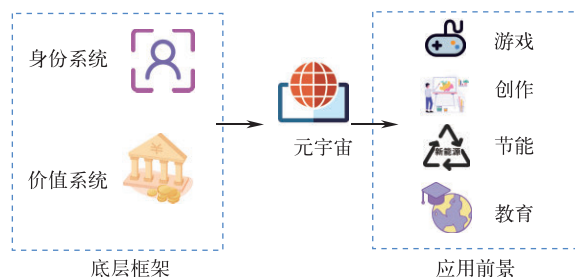


图2 元宇宙的架构

时，通过分布式记账确保不易篡改，有效保证数字资产的可靠。当前，区块链的各类应用都需要强大算力支持，算力的基础就是可靠的供电，灵活调配新能源满足类似“东数西算”工程的算力增长需求，这是对新型电力系统的现实要求。再者，需要云计算和边缘计算技术支持，参与者在元宇宙中进行学习活动、创造财富和开展社交，虚拟世界与现实世界自如切换的前提是云计算已经成为基础设施。根据互联网数据中心（IDC）预测，中国2025年仅数据中心就将消耗电力3 842.2亿kW·h，这是对新型电力系统的供给需求。元宇宙不是单纯的增强现实，而是要保证类似内容分发网络（CDN）可以在参与者使用头戴式显示设备等接入设备时，能够实现各类运算、存储、网络设备的能源供应，无线充放电也将成为基本条件，这是对新型电力系统的技术需求。

2. 元宇宙“双碳”前景评估

根据国家能源局的统计，我国单位能源的碳排放强度是世界平均水平的1.3倍，是欧美国家的2.1倍。在采用新能源作为电网的主要发电来源后，碳排放量将有明显改善。但在2030年我国碳排放达峰之前，元宇宙很可能并未发展到成熟期，因此需

要对其排碳量作出有效评估。从加密货币运行数据来看，布局触达全球的云数据中心系统，对电力可靠性和灵活性的要求极高。在灵活性方面，从常用的评估均衡模型可以看出，考虑灵活爬坡产品（Flexible Ramping Product, FRP）出清模型目标函数的参与灵活性调节的机会成本为

$$\sum_{i \in \phi^{\text{FRP}}} \sum_{t \in \phi^{\text{T}}} C(p_{i,t}^{\text{FRP,U}}) + \sum_{i \in \phi^{\text{FRP}}} \sum_{t \in \phi^{\text{T}}} C(p_{i,t}^{\text{FRP,D}}) \quad (1)$$

式中， ϕ^{FRP} 和 ϕ^{T} 分别表示FRP的市场成员和频率调节； $p_{i,t}^{\text{FRP,U}}$ 和 $p_{i,t}^{\text{FRP,D}}$ 分别表示市场成员 i 在时段 t 为FRP预留的上调和下降功率； $C(\cdot)$ 为成本函数。

考虑通过增加碳捕集利用技术（CCUS），需要在成本函数中增加 P_c ，其表达式为

$$P_c = P_w + P_g + P_u \quad (2)$$

式中， P_w 表示碳捕集成本消耗； P_g 表示碳利用设备成本消耗； P_u 表示参与灵活性调节的成本消耗。

可以看出，在增加了灵活性调节后，元宇宙等容易出现短时间、高耗能的产业，将背负较大减排压力。

在可靠性方面，以“双碳”为目标设想新型电力系统建设，首要目标是发电主体由化石能源发电转向可再生能源发电。但是，由于风光等新能源出力受自然条件影响较大的原生性问题，新能源发电一般需要装机量超过50%时，发电量才可能接近1/5。需要重点关注的是年利用小时数客观限制。经过计算可以得出：新能源发电厂年度利用小时数只占最大的火电厂的1/3~1/2，所以需要总装机量达到目前火电厂装机量的3倍以上才能满足当前用电量需求。不同类型发电主体每年平均利用小时数如图3所示。

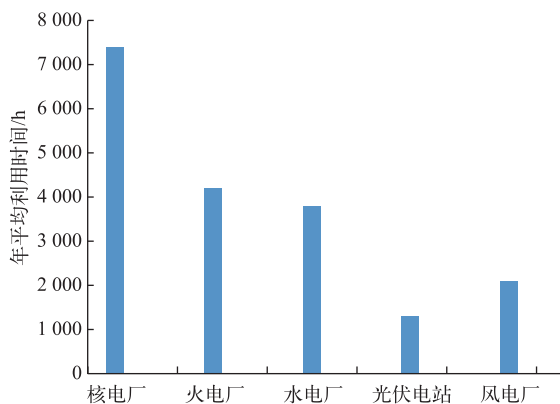


图3 不同类型发电主体每年平均利用小时数

提升新型配电网系统的关键能力

2021年，国家电网公司启动以新能源为主体的新型电力系统建设，全面革新网架规划、运维调度和计费模式等主营业务，建设具有灵活性、可靠性、安全性和经济性的柔性配电网成为首要任务。在配电网设计规划和技术攻关中，已初步考虑应用相关的元宇宙技术。

1. 规划建设

以元宇宙规模的负荷接入形式，不能将其简单归为一种新的互联网应用，电网需要从规划阶段就将元宇宙一类的新型用能模式纳入考量，配合数据中心、5G基站集群等新型基础设施建设执行协同设计。衔接“双碳”目标，新型电力系统的一个显著特征是储能装置的大规模接入，储能可以在配电网灵活性、可靠性及元宇宙能源高并发需求时提供足够的电力保障。考量城市规模和国土空间规划的约束条件，分布式储能与虚拟电厂等技术的规划设计组合，可以满足元宇宙服务提供商、普通用户、现实世界维持系统和安全数据第三方等市场参与主体在削峰填谷、频率调节等电力辅助市场的实际需求。新型配电网规划中，尤其需要充分发挥储能装置在分时电价与多种能源价格、冷热负荷出力、新能源发电接入等调节能源互联网功率和效益的支持能力。新型电力系统规划建设三项要因如图4所示。



图4 新型电力系统规划建设三项要因

2. 运行维护

元宇宙采用的虚拟世界接口是VR头戴式显示设备，通过类似英伟达公司开发平台Omniverse建立数字孪生的多样化可能世界。遵循当前元宇宙特

征推论，在虚拟世界中人可以同时拥有多重身份，这带来了根本变化。传统的以用户数量及用户类型进行电网运行维护计划设计的模式不再适用。新型配电网应该将任务计划区分为常规系统性检修任务和临时预测性检修任务两种，结合配电网广泛布设在城市、乡村、厂区等地区，满足费控、计量、采集、无人机巡检和故障自检等新型电力系统运维能力，需要依据元宇宙等需求侧变化和配电网供给侧传感器网络和环境监测信息，由具备人工智能能力的智慧工单系统分发给对应运维人员，具有电网态势感知、数据准确可靠、检修安全及时和调控智能灵活的特点。

将新型配电网在元宇宙中进行一定层次的部署，是提升运维水平的第二个重要方面。一般认为，新型配电网将从发电厂到用户的单向输配电模式转为“源网荷储”双向互通模式，因而将新型配电网物联网信息及可能的发展形态在元宇宙中进行部署，直接从元宇宙中获取配电网相应的运行数据，对于故障预演和检修方案执行有前瞻性的论证辅助作用。此外，从元宇宙的身份系统和价值系统出发，配电网提供给综合能源互联网的运行信息，也可以采用智能合约的方式提供给用户，作为其在虚拟世界中的决策参考，保证能源互联网与元宇宙等信息互联网之间的深度融合。



图5 配电作业人员依据物联网设备反馈信息进行定点巡检

3. 应急保障

新型电力系统是典型的信息物理系统（CPS），配电网作为综合能源互联网的关键环节，被视为一个规模庞大的“能源路由器”，在应急保障中同时提供能源支撑和网络支撑。具体而言，面对极端天气频发、新能源接入带来的跨能源网络冲击和国际间碳排放博弈加剧等因素，能源支撑体现在可靠性和灵活性两个方面。在新型配电网的能源层面，分布式光伏、风电和生物质等发电端接入电网，必须部署足够的储能装置才能同时实现经济性、可靠性和灵活性。

在配电网的信息及数据安全层面，需要将辖区内保供电的元宇宙等跨区域、大规模新型应用的电网配置信息及需求侧管理信息提前进行“两地三中心”的部署，以保障数据的容灾、备份和迁移能力。可以预计，新型配电网的应急保障在现实世界能源网与虚拟世界数据网之间同时进行且协调配合。新型电力系统现实与虚拟应急保障框架如图6所示。

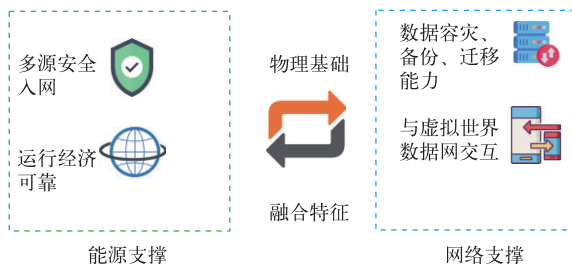


图6 新型电力系统现实与虚拟应急保障框架

对我国构建新型配电网系统的启示

1. 法律层面

当前对元宇宙的研究集中在虚拟融生、多元化、沉浸感、价值、伦理和文明构建等方面，科学研究与工程实践都取得了一定程度的进展。随着元宇宙关键技术区块链的产生与发展，去中心化、低碳性、不可篡改性引发的一系列关于数字资产与虚拟伦理之间的司法实践与舆论争议持续至今。法律是规范社会一切关系的准则，因此需要对元宇宙的可能形态以及能源特征进行前瞻性预测和指导性规范。当元宇宙量级的数字应用产生用电尖峰或供用电产权纠纷时，现有的物联网感知网络和电力网络并不能及时进行回应，类似的基础性电力法律问题尤其需要各方关注。元宇宙为人的自我价值实现提供了全新路径，鉴于已经颁布了《个人信息保护法》和元宇宙底层技术的去中心化特征，处于以用户为中心的公司定位，电网企业还面临为了新型配电网的安全可靠运行而进行元宇宙的非侵入性测量的法律和技术的双重困境，这是跨学科领域的法学人士需要重视的。当前，电网企业可以基于新型电力系统建设框架，开展关于元宇宙等相关新兴产业的需求侧研究，以便在与数字技术、虚拟伦理等方面的法律人员共同研讨元宇宙类型应用的法律建设中争取主动，进而在保障国家、社会和公民权益的同时，指导响应新型电力系统的规划、运维和应急

保障建设。

2. 技术层面

无论是国外主要经济体还是国内一线城市，已经开始关于元宇宙的新兴产业布局规划。电网公司具有足够长期可靠的牌优势和高电压等输变电方面的技术优势，作为2021年全国碳交易市场的首批覆盖行业，也积累了相当多的关于调峰调频辅助市场和绿色金融交易经验。然而，作为信息物理系统的重要载体，新型电力系统需要在现实与虚拟两个领域加快技术研究和应用。新能源方面，需要采用超大规模电力电子设备改造现有电网的技术储备，以平抑光伏发电、风电和潮汐发电等周期性发电端接入带来的局部稳态冲击；输电方面，需要在柔性输电线路的自适应、自愈性以及通信网络的可靠性等方面积极引入输控分离思想，建立具备将分布式参数及潮流特性进行大数据分析并具有实时优化调度策略的能源互联骨干网；变电方面，需要将智能变电站的在线全数据状态进行元宇宙内数字孪生，提升对高压断路器、隔离开关、母线、电流互感器、GIS设备及二次设备等进行多场景同时运行的全方位状态感知技术探究，并将控制策略及时分发到边缘计算端，提升全寿命管控水平；配电方面，在投入足够储能装置的前提下扩大虚拟电厂的覆盖范围，注重开发低碳或“零碳”排放的微电网管理单元，协调主动配电网与虚拟电厂的削峰填谷及消纳风电和光伏发电等改善电能质量的能力。

3. 市场层面

近年来，我国新能源装机量和发电量始终位于全球第一，但同时弃风弃光仍然存在。根据国家能源局的数据，2020年我国弃风发电量达到160亿kW·h，弃光发电量达到51亿kW·h，部分光伏发电大省弃光率超过10%。电网的灵活性和可靠性不足，是造成弃风弃光长期存在的根本原因。现有电力现货交易市场运营经验反映出：需要在灵活性资源方面提高配置比例，并提供多维度金融产品保证市场运行流动性。为有效应对新能源高比例接入和保障元宇宙等新兴产业发展，电力中长期期货市场需要得到更为丰富的激励机制，消除灵活性资源投资者的回报不足和元宇宙相关方的用能充裕性、可靠性担忧。元宇宙是跨时空的应用体验，新型电力系统是跨区域能源互联网市场机制运作的物理载体，两者融合

发展是有效应对能源和信息容灾需求的根本途径。同时，新型电力系统在元宇宙的布局，也有助于降低能源交易和碳排放，是激活市场各方参与积极性和技术攻关动力的关键要素。

结束语

元宇宙与新型电力系统均处于方兴未艾的建设初期，分别处于能源互联网需求侧和供给侧两端。当前，我国正处于科技强国和共同富裕的建设期，迫切需要将互联网运营经验应用于工业互联网建设，进而催生新一轮技术革命、金融革命。以元宇宙的典型特征梳理作为切入点，将“双碳”等中长期目标纳入考量，逐一分析新型配电网需要对应提升的规划建设、运行维护、应急保障等关键能力，进一步拓展了新型配电网研究与建设的边界。结合面向未来的客观现实与虚拟世界的潜在需求，从法律、市场和技术三个重点维度提炼了新型电力系统建设的启示与方向，以期对“双碳”目标下建设能源互联网提供有益参考。EA

参考文献

- [1] 江秀臣，许永鹏，等．新型电力系统背景下的输变电数字化转型[J]．高电压技术，2022，48(1): 1-10.
- [2] 王秀强．新型电力系统构建“源网荷储”新生态[J]．能源，2021，40(7): 32-34.
- [3] 周博文，奚超，等．元宇宙在电力系统中的应用[J]．发电技术，2022，43(1): 1-9.
- [4] 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)，2021：1-8．https://doi.org/10.14100/j.cnki.65-1039/g4.20211119.002.
- [5] 郭宏业，陈启鑫，等．电力市场中的灵活调节服务：基本概念、均衡模型与研究方向[J]．中国电机工程学报，2017，37(11): 3057-3066.
- [6] 龚超，张轩，等．考虑虚拟电厂可调能力的综合需求响应市场出清策略[J]．南方电网技术，2021，15(12): 56-65.
- [7] 张昊．提高配电网新能源消纳比例的分布式储能系统优化配置方法[J]．电气应用，2022，41(3): 56-63.