



基于工程生态论对能源互联网的分析 and 认识

傅志寰^{1*}, 高锋², 童亦斌³

1. 中国国家铁路集团有限公司, 北京 100080;

2. 北京大学 工学院, 北京 100871;

3. 北京交通大学 电气工程学院, 北京 100044

摘要: 本文基于工程生态论, 运用工程生态新思维方式对能源互联网进行再认识。能源互联网具有多样性、包容性、开放性、适应性、互动性、平衡性、韧性、确定性和不确定性、内生力量驱动的进化性, 在时空分布上同时具有聚集性和分散性, 而能源互联网中不同种类能源的生态位具有变迁性。在此基础上, 立足于能源互联网生态的微观、中观和宏观三个层次, 分别提出了对能源互联网中的工程个体、能源互联网与产业(地域)的关系、能源互联网与国家(全球)经济社会的关系等方面的新认识, 为新型能源体系下能源互联网发展提供新的思维方式。

关键词: 能源互联网; 工程生态; 生态思维; 多能融合; 信息物理系统

中图分类号: TM73; N031

文献标识码: A

文章编号: 1674-4969(2025)01-0042-13

引言

能源互联网是新一代革命性的能源系统, 是能源系统和互联网深度融合的产物^[1]。能源互联网的核心功能在于最大限度开发利用可再生能源, 提高能源利用效率和劳动生产率, 为用户提供优质服务, 为建立绿色低碳、安全高效和开放共享的能源生态提供有力支撑^[2]。

目前我国可再生能源发展呈现出强劲增长势头。一是装机规模持续扩大。截至2024年6月底, 全国可再生能源发电装机达到16.53亿kW, 同比增长25%, 约占我国发电总装机的53.8%。二是发电量稳步增长。2024年上半年, 全国可再生能源发电量达1.56万亿kWh, 同比增长22%, 约占全部发电量的35.1%。其中, 风电发电量5088亿kWh, 同比增长10%; 太阳能发电量3914亿kWh, 同比增长47%^[3]。

收稿日期: 2024-12-03; **修回日期:** 2024-12-18

基金项目: 中国工程院战略研究与咨询项目“工程生态建构理论与发展战略研究”(2024-XZ-69)

作者简介: *傅志寰(1938—), 男, 正高级工程师, 中国工程院院士, 研究方向为铁路和综合交通运输。E-mail: fuzhizhuan138@sina.com (通讯作者)

高锋(1995—), 男, 助理研究员, 研究方向为能源系统建模和大数据分析。E-mail: gaofeng@pku.edu.cn

童亦斌(1969—), 男, 副教授, 研究方向为电力电子和主动配电网技术。E-mail: ybtong@bjtu.edu.cn

引用格式: 傅志寰, 高锋, 童亦斌. 基于工程生态论对能源互联网的分析 and 认识[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2025, 17(1): 42-54. DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.20240150. CSTR: 32282.14.JER.20240150

Fu Z H, Gao F, Tong Y B. An Analysis on the Energy Internet from the Perspective of Engineering Ecology[J]. Journal of Engineering Studies, 2025, 17(1): 42-54. DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.20240150. CSTR: 32282.14.JER.20240150

三是凸显技术创新与模式创新。一系列关键技术实现突破, 如光伏电池效率不断提高, 成本不断下降, 为大规模应用提供了有力支撑。大型风、光基地, 水、风、光一体化, 光伏治沙, “农业+光伏”以及可再生能源制氢等新模式、新业态不断涌现, 推动了可再生能源产业的多元化发展。四是国际影响力提升。我国可再生能源的发展不仅为中国式现代化建设提供了能源保障, 还为全球可再生能源发展、绿色低碳转型贡献了中国智慧和产品。近年来, 我国新增装机占全球可再生能源新增装机的比例不断提升, 处于遥遥领先的地位。如何更好地建设我国的能源生态, 如何发展好能源互联网, 需要从工程哲学的视角, 加以深入研究。因此, 本文基于工程生态论, 运用工程生态新思维方式对能源互联网进行再认识, 厘清能源互联网作为工程生态的基本特征, 并从能源互联网生态的微观、中观和宏观三个层次, 分别提出了对能源互联网中的工程个体、能源互联网与产业(地域)的关系、能源互联网与国家(全球)经济社会的关系等方面的新认识, 从而新型能源体系下能源互联网发展提供新的思维方式。

1 从传统能源网到能源互联网的演变

1.1 对传统能源系统的基本分析

传统能源分为一次能源(如煤、石油和天然气等

化石燃料)和二次能源(如电、热)。传统能源系统涵盖了能源的生产、传输、储存和利用等环节。在生产环节, 它包括了能源的开采与转化过程; 在传输环节则涉及铁路、水运、输油管道、输气管道、电网、热网等多种方式。同样, 储存和利用方式也呈现出多样化的特点(见图1)。

传统能源的特点是能量密度高, 技术相对成熟, 具有较高的稳定性和可靠性。然而传统能源中化石能源的使用往往造成环境问题, 如温室气体排放、空气污染和水污染。况且化石燃料资源也是有限的, 大量开采与利用加速了资源的枯竭, 显现出不可持续的特性。再者, 传统能源的储量分布不均, 不同国家禀赋差异大^[4]。以我国为例, 煤炭资源丰富, 而石油与天然气则相对匮乏, 导致石油和天然气的高度对外依赖, 这对国家的能源安全构成了严峻挑战。

传统能源系统还具有集中式、单向性的特点, 主要依赖煤矿、油气田或者大型电厂等生产单元进行集中生产, 这些生产单元通常位于远离负荷中心的地方, 需要借助传输网络将能源输送到消费者处, 能量流动呈现单向性; 一旦发生故障, 可能会导致大面积的能源供应中断。在传统能源系统中, 消费者通常处于被动接收状态, 没有直接参与运营和管理。

此外, 传统的能源系统——煤炭系统、石油系统、天然气系统、电力系统, 各成体系, 彼此独

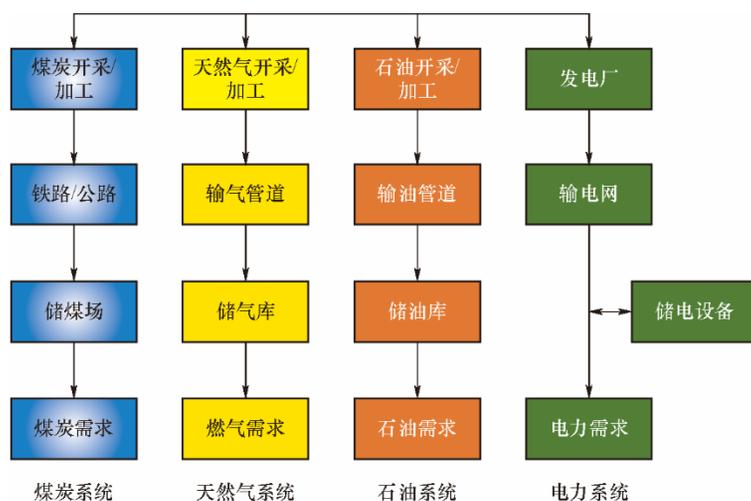


图1 传统能源系统示意图

Figure 1 Schematic diagram of traditional energy systems

立, 相对割裂, 往往难以实现优势互补, 综合能效相对较低。

1.2 立足工程生态论对能源互联网的新认识

在自然生态系统中, 不同生物物种借助食物链和信息传递链构成了错综复杂的网络。同时, 这些生物还与非生物环境(如水、土壤、气候等)进行交互, 进一步扩展了这一网络的广度^[5]。与此类似, 也可把能源系统看作是一个点、链、网高度关联和相互依存的能源网络, 其中包括各类能源的生产、传输、储存和消费等多个环节。生产者、消费者以及与周边其他工程和环境的关系相当于自然生态中的生物个体、种群、群落、生态系统彼此之间的关系。

不同于传统的能源系统, 能源互联网这一“生态系统”的“物种”种类更为繁多。一次能源除了水能、煤、石油、天然气, 还包括风能、太阳能、生物能等可再生能源。二次能源除了电、煤气、蒸汽, 还有氢能等。能量转换装置除了煤电、燃气发电机组, 还有光伏板、风力发电机和电力电子电能变换装置等。能量存储方式除了油库、气库、抽水蓄能, 还增加了新型电力储能, 比如电化学储能、压缩空气储能、机械储能等。能量传输在传统的集中单向输送的基础上, 出现了分布式电源、微网和分布式能源站等多样化的形式。能源用户主动参与系统调节的能力和意愿都显著提升, 交互关系也变得更加灵活和多元化^[6]。

有别于传统的能源系统, 能源互联网是按照互联网理念构建的新型能量和信息双向互动的交换与共享网络, 利用先进的电力、信息以及能源管理技术, 以大电网为依托, 以大量微电网、分布式能源作为辅助和补充, 在对等、开放的信息能源一体化架构中, 最大限度地接纳可再生能源, 将集中式的单向电网, 转变成与众多不同类型消费者互动的开放型智能网络(见图2)^[7]。

区别于传统能源系统, 能源互联网作为一个高度信息化、智能化的新型能源系统, 具有信息技术与能源系统深度融合的特点。其中, 人工智能对于具有间歇性和波动性的可再生能源, 提供实时的能源供需信息处理能力, 使得能源供需管理变得更加精准和灵活

多变^[8]。智能化的电力分配和控制系统, 能够根据不同用户的电力需求和优先级, 自动分配和调整电力资源, 从而实现电力资源的最大化利用。同时, 能源互联网还可以实时监测电力系统的运行状态, 及时发现和解决潜在的电力故障和安全隐患。

人工智能对能源互联网的支撑不仅限于提高能源利用效率, 还包括通过智能化技术提高能源供应的稳定性。智能调控和优化算法有助于提高能源转化效率, 减少能源消耗和环境污染, 助力实现“双碳”目标^[9]。与此同时, 特别应该强调的是, 随着人工智能新技术的普及, 能源互联网的进化加快了步伐。智能巡检、智慧监管不仅提高了生产效率, 更在减少人为失误方面发挥着至关重要的作用。例如, 国家电力投资集团有限公司广西公司的坭坪风电场, 正在逐步配备无人巡检机器、在线监测系统、红外热成像视频监控系統、智能运维单兵、自动监测报警器等, 以提升运行安全性。一线工人可在市区的生产运营中心通过数字系统远程作业。恶劣天气下, 可以借助无人机与机器人辅助人工进行巡检^[10]。

随着电网、热网、气网等用户量激增, 海量数据使得精确预测变得愈发困难, 而人工智能技术为能源互联网中的多元负荷预测提供了新的手段, 通过借助物联网技术改进电网的监控质量, 有效克服传统方法存在的局限性。例如, 国家电网有限公司华北分部构建了具有自主学习功能的预测模型, 该模型结合气象环境数据, 显著增强了分析能力。2024年迎峰度夏期间, 最大负荷预测准确率均值同比提高1.2个百分点, 准确率最高达99%以上。据此优化了电力生产和输送计划, 避免电力供应不足或电力闲置的情况出现, 提高了能源互联网运行质量^[11]。

虽然能源互联网具有上述优势, 但也有一些不足之处。一是风、光能源出力的随机性和波动性给电网的接纳和调度带来了困难, 不但需要技术创新和政策优化加以解决, 同时要加强支撑性调节性电源建设, 这往往给一些集中式能源不足的地区带来挑战。二是信息(数据)系统也带来了新的安全问题, 网络攻击、黑客入侵等可能导致能源系统紊乱、不受控制, 最终威胁整个能源互联网的安全, 因此亟待开发和应用信息防护技术。三是经济合理性问题。尽管风、光等新

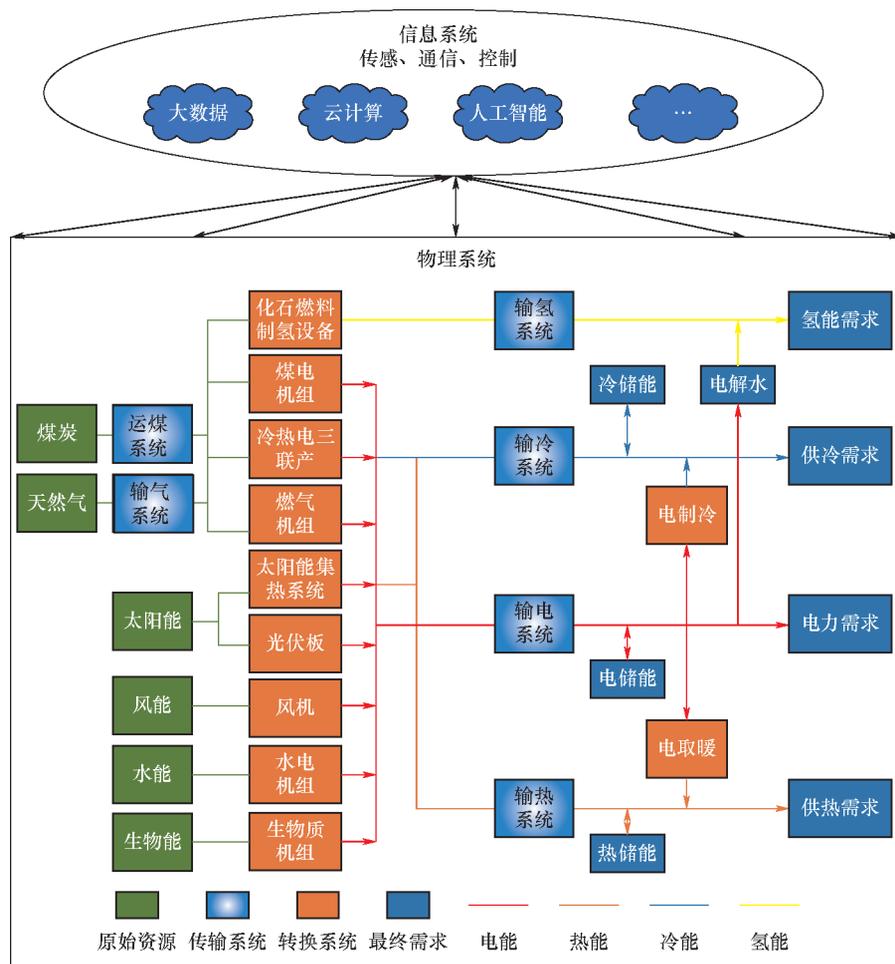


图2 能源互联网示意图

Figure 2 Schematic diagram of the energy internet

能源发电的边际成本低, 但能量密度小、利用时长有限, 加之高比例新能源并网需配置储能装置, 这无疑会增加总成本。

2 能源互联网的基本性质和特征

2.1 能源互联网具有多样性、包容性

类似自然界的生物群落, 能源互联网具有多样性、包容性, 是由多样异质要素、异质成员构成的具有广义生态特性的系统。换句话说, 能源互联网中存在着多样化的能源类型、技术以及各种参与方, 这些异质成员通过相互协同形成一个具有生态系统特性的整体。不同类型的能源包括化石能源(煤、石油、天

然气)、核能、可再生能源(太阳能、风能、水能等)等多种异质能源。多样化的技术则包括各种发电、传输、存储、利用以及系统的智能转换、控制装置等。能源互联网中还包括了各种异质的参与方, 不仅有传统的大型能源企业, 还有小型分布式能源生产商、微网运营商、能源服务企业以及能源消费者等。能源互联网的包容性体现在能够接纳具有分散碎片化、时变随机特征的能源, 并通过智能化管理进行聚合和优化配置; 实现能源的个性化供应和精准管理, 支持多种能源消费模式, 满足不同用户(无论是大型工业企业还是普通家庭)的需求。此外, 能源互联网还支持接入不同技术的设备和系统等。这种包容性使得新旧能源设施能够和谐共存, 逐步实现能源系统的升级和转

型。例如, 山东胜利油田之前是单一的产油区, 后因地制宜发挥丰富的太阳能的优势, 建设了240个光伏场站, 装机规模达435 MW, 年发绿电5亿 kWh, 构建了“源网荷储”互动的能源互联网, 实现能源生产的多样化。目前油气生产用电中绿电占比已经突破23%。为提高电力系统的稳定性, 油田构建了一体化管控平台, 均衡管理包括火电在内的各类电源资源, 实现多能平衡互济^[12]。

江苏同里区域能源互联网示范区也是一个典型的例子。示范区集合光伏、光热、风力、地源热泵、储能等多种能源供应形式, 以电能路由器为核心形成了交直流混合能源网络, 能够兼容特高压水电大规模输入、风光储清洁能源灵活接入。此外, 示范区构建的智能能源服务体系, 涉及交通、建筑、综合能源、基础资源运营等多个领域, 实现了彼此间的全数字链信息互动^[13]。

2.2 能源互联网具有开放性、适应性、互动性

在自然界, 开放的系统通过不断与外界进行物质、能量以及信息的交流, 动态地适应外部环境的变化。类似地, 能源互联网能够不断吸纳新技术、新设备、新系统以及新参与者, 迅速响应外部需求变化。不同于传统的电网、管道网、热网各自相对独立封闭发展, 能源互联网更强调对外界的开放与融合。

在开放性方面, 新型电力系统支持各种设备如分布式能源、储能、用能等的便捷接入, 支持各种新型能源如氢能、生物质能的加入, 支撑各类能源交互转化如电能转化学能、电能转热能, 同时还能实现不同类型能源、储能和用户的相互协同运行。由于新型电力系统正在成为各类能源网络有机互联的枢纽, 所以更具代表性。

在适应性方面, 能源互联网中源、网、荷、储各个环节紧密衔接, 具有灵活调节能力, 外部设备可以凭借标准化的接口和通信协议接入能源互联网, 实现“即插即用”。能源互联网中的电源和负荷均可作为可调度的资源参与电力供需平衡控制, 通过价格机制引导用电行为, 汇聚各类柔性、可调节资源应对电力系统调峰^[14]。例如, 深圳未来大厦所采用的新型建筑节能能源系统, 充分展现了能源互联网的开放性和适应

性。该大厦的屋顶与立面安装了光伏发电装置, 地下配电室安装有电池储能装置, 停车场内的充电桩具备对电动汽车双向充放电的功能。系统运用直流配电, 将光伏、储能、充电桩、空调及照明等设备连接在一起, 不仅使得电能利用效率更高, 而且这些设备还能够跟踪直流电压变化自动调整运行状态。此外, 空调系统也同样展现出“柔性”特点, 可以根据系统整体的供需情况灵活地调整工作状态^[15]。

在互动性方面, 随着能源互联网和可再生能源技术的快速发展, 能源与负荷的角色互换成为可能。建筑物通过屋顶铺设的光伏设施, 不仅能从电网中获取电能, 也可以在电力富余时将多余电能回馈给电网, 实现了用户与供电者融为一体。类似地, 电动汽车本身是一种用电设备, 但如果能够有效利用其车载电池, 可以形成一个超大规模的分布式储能网络, 在闲置时段能够将电能反向销售给电网^[16]。正如自然界中某些植物捕食昆虫而被称为食虫植物一样, 呈现出生产者与消费者同体化现象。还要强调的是, 能源互联网不仅是单一能源的源、网、荷、储的纵向互联, 更是不同能源之间的横向互联, 这使得多种能源之间可以实现协同互补。例如, 北京亦庄“碳中和”智慧园区整合分散式风电、分布式光伏、用户侧储能、水蓄冷等多种清洁能源, 创新微燃机三联供系统、微电网控制系统、地源热泵技术, 攻克风能、光能、地热能的多能互补和用能调控技术, 突破了受自然条件影响(光照时间短、风速低等)导致无法提高可再生能源占比的问题, 实现了园区可再生能源消费占比超过50%^[17]。

能源互联网的开放性、适应性、互动性, 主要得益于数字化、网络化及其智能调节功能。借助负荷预测、储能管理以及用电负荷调度等手段, 该体系能有效应对光伏与风力发电大规模接入和出力随机波动所带来的挑战, 保证电网运行安全和效率。能源互联网中的发电单元和用户能够进行实时数据双向互动, 通过网络反馈回来的数据可以使发电单元掌握用户的消费习惯, 从而对发电量进行合理调节, 达到提升资源利用率的目的。同时, 依托实时大数据监控技术, 各类可再生能源并网的难题可得以解决, 构建了集天然气发电、风电、光伏发电、储能等“多位一体”的能

源监控平台, 实时保障电能质量和电力系统安全稳定运行^[7]。

2.3 能源互联网在时空分布上同时具有集聚性与分散性

在自然界, 生物具有集聚性与分散性。集聚性是指一些植物或其他生物定居在一起, 形成紧密联系的整体。这种集聚性有助于生物之间的资源共享、信息交流和协同进化。而生物的分散性则是指生物在空间均匀或稀疏地分布, 有助于提高生物应对恶劣环境的能力, 增加生存机会。

“工程生态”视角下, 能源互联网也同时具有集聚性和分散性的特征。能源互联网是集中大电网和分布式“局域网”的有机组合体。一方面, 大型发电站通过大电网的高压输电线路将电力传输到远方城市和工业中心就是集聚性的典型。这里, 大型发电站包括火电机群、光伏、风电集群等, 是生产者的聚集地; 城市和工业中心里包括工业用户、居民用户等, 是消费者的聚集地。例如, 三峡电站由34台水轮发电机组组成, 是我国“西电东送”和“南北互供”的骨干电源点, 电能通过超高压直流输电线路被送往上海、江苏、广东等负荷大省^[18]。另一方面, 基于分布式能源构建的微型电力系统(“局域网”)则接近用户, 便于在一定区域内实现能源供应与消纳利用效率的最大化, 这是分散性的具体体现。毫无疑问, 传统的集聚式的能源系统需要现代化升级, 但目前更应关注的是发展分布式能源。分布式能源有时被称为虚拟电厂, 即“实质的电力, 无形的电厂”。虚拟电厂实际上是通过数字化、网络化、智能化的能源互联网, 把工厂、商场甚至居民家的屋顶光伏、电动汽车等各类分散的能源汇聚起来, 统一协调控制, 而形成的“电厂”。例如, 深圳的某虚拟电厂管理平台接入了45家小型虚拟电厂运营商, 涵盖建筑楼宇空调、新能源汽车、5G基站等9类共计3万多个分布式资源, 接入规模超过265万kW, 可有效应对尖峰负荷^[19]。

2.4 能源互联网具有内生力量驱动的进化性

在生态系统中, 物种和种群在自然选择的条件下, 总是朝着越来越高级的方向演化。类似地, 能源

互联网的功能也体现出其不断进化(创新)的特征。例如, 国家骨干电网为了提高电力传输效率、降低能源损耗、延长输电距离, 不断提高电网电压, 从220 kV陆续提高至750 kV, 再提升为特高压1000 kV或直流电压 ± 800 kV^[20]。又如, 光伏、风电等分布式能源面对用户侧多样性场景需求(如各种建筑类型, 甚至是朝向和遮挡等), 以及风光内在的间歇性和波动性, 不断创新技术以满足多样化需求和复杂的生产环境。再如, 为了适应农村地区居住建筑的特点, 开发了能与屋瓦在外形和功能上相兼容的光伏组件, 甚至还有多个颜色可供客户选择; 设计了专门的幕墙玻璃组件, 既能透光又能发电, 并且还能依据建筑外观定制成异形^[21]。目前随着数字化、网络化的推进, 能源互联网正在实现源、网、荷、储的智能化, 实施智能预测、监测、配置等, 改变了过去电网运行主要依赖经验进行决策的传统方式^[22]。

2.5 能源互联网既有确定性又有不确定性

确定性和不确定性共同塑造了生物世界。确定性主要体现在自然生态的连续性和稳定性上。生态系统中的各个组成部分, 如生物种群、环境因子和能量流动, 都遵循一定的规律保持相对稳定状态。然而不确定性也是自然生态中不可忽视的一方面, 如气候变化、物种迁移、疾病传播等, 这些因素都可能对生态系统的结构功能产生重大影响。这种不确定性和确定性并存的状态, 使得自然生态具有高度的复杂性, 以适应各种变化和挑战。与此类似, 能源互联网的发展也具有确定性和不确定性。就确定性而言, 随着全球对可再生能源的需求日益增长, 以及环保意识的提高, 能源互联网的建设和运营成为必然, 尤其是在风能、太阳能应用等领域, 其发展前景十分广阔。据此, 许多国家都出台了相关支持政策, 包括补贴、税收优惠等。然而能源互联网也面临许多不确定性。以电力系统为例, 尽管基于多年形成的技术体系支撑了整个系统能够稳定可靠运行, 然而随着风力和光伏等新能源占比持续提高, 电力供给、需求双侧呈现高度随机性。系统平衡机制由“确定性发电跟踪不确定负荷”转变为“不确定发电与不确定负荷双向匹配”, 对多年所建立的供需平衡理论带来重大挑战。此外,

氢能的应用得到了越来越多的政策支持,这也是确定无疑的。然而,氢能的发展也面临着一些不确定性,如储存和运输成本过高问题尚未解决,安全水平有待提升,有关氢能的基础设施建设需要大量投入^[23]。这意味着,氢能得到大规模推广的时间表是难以确定的。储能是能够有效应对新能源波动性和间歇性的重要手段。利用储能降低风、光给电力系统带来的安全稳定运行问题,这个方向是明确的。但是,具体采用何种形式的储能,各种储能如何规划配置,受技术发展和产业政策的影响,存在较大的不确定性。例如,现阶段的电力系统主要依靠抽水蓄能,其技术成熟,调控灵活,但站址选择则受地理条件限制;电化学储能具有配置安装灵活和能量转换效率高等优点,近些年得到飞速发展,但经济性和安全性对于许多应用场景并不一定适合。尽管电动汽车动力电池可发挥储能的作用,但要实现规模化应用,还需妥善解决商业模式等相关问题。未来何种储能会成为主力,或是通过哪几种储能配合实现更高的性价比,都仍有待进一步的研究和探索。

2.6 能源互联网具有平衡性和韧性

自然界的生态平衡性和韧性维护着生态系统的稳定与健康。生态平衡是通过生态系统的自我调节实现的,即需要生态系统内部各要素之间的相互作用和制约,以及生物与环境之间的适应与协调。生态系统的韧性则能使其在遇到环境变化、自然灾害时,减少生态系统崩溃的风险。

在能源互联网系统中,随着海量新能源及各类技术设备的接入,尤其是风电和光伏的随机性、间歇性更加剧了系统运行的波动,导致能源网络稳定性下降。如何使新的复杂的巨型能源系统保持平衡并具有韧性,显得十分重要。

众所周知,传统电力系统的实时平衡依赖出力可控的常规电源,而新型电力系统将以可再生能源发电为主体,因此发电侧调节能力显著下降。不过,随着智能化发展,目前我国电力系统已经能够通过多能互补等方式挖掘系统的调节能力,即以储能为媒介实现发电与用电解耦,塑造全新平衡模式。具体而言,就是开发存储装置,使“发一用”实时平衡变为“发一

储一用”平衡,在空间、时间上匹配电力供给与需求。应该说,我国能源互联网已经有了多种形式的储能装备。抽水蓄能的技术相对成熟、储存能量大、单位投资成本低,然而其建设周期较长。因此,还应进一步发挥压缩空气储能、飞轮储能、电化学储能、电磁储能等新型储能的优势,使其在平衡调节、增加韧性等方面发挥作用,成为构建能源互联网的重要基础^[24]。此外,能源互联网也可通过需求响应的方式引导用户侧调节电力需求,如在用电高峰期,适当提高电价或者直接给予经济激励,降低用电负荷,实现供需平衡。与传统能源系统不同,能源互联网能使不同类型的能源实现有机融合、优势互补,从而提高能源供应的可靠性和韧性。

与生物界类似,能源互联网的韧性还表现在自愈能力上,这就要求能够实时监测系统的运行状态。一旦发现故障,系统能迅速定位并隔离有问题的部分,同时启动恢复程序。这恰如生物体在受伤后能够迅速感知并进行局部封闭,以防止感染。能源互联网在实行隔离故障后,可自动调整网络结构,通过备用线路或设备来恢复供能。与此同时,系统的自愈能力还体现在不断学习和优化自身的运行策略上,即通过收集和 analyzing 历史数据,识别出潜在的风险并提前采取相应的预防措施。例如,甘肃酒泉的某新能源场站根据实时监测情况和最优控制策略,利用装置标准化接口对新能源、储能、可中断负荷、常规机组等资源进行协调控制,可在 200 ms 内及时应对电网故障,为新型电力系统的故障防御体系建设提供了技术支撑^[25]。

2.7 能源互联网中不同种类能源的生态位具有变迁性

能源互联网包括众多能源种类,不同种类的能源的生态位是不断变化的。不同种类的能源生态位与所占有的资源有关,包括资本或资金、市场规模、技术或工艺以及政策扶植、公众支持等。长期以来,在能源系统中,煤炭、石油、天然气等化石能源拥有更多的份额,即较高的生态位。不过,我国近年来为推动可再生能源发展并逐步替代化石能源,出台了一系列政策举措,如 2005 年制定《中华人民共和国可再生能源法》^[26],其后又发布系列法规、政策,对风电、

光伏等可再生能源项目给予前所未有的大力度支持。与此同时,企业、院校、研究机构开展技术创新,解决了系列技术问题,降低了制造、建设和运营成本。在政策利好和技术进步的双重驱动下,目前我国风力发电和光伏发电来势迅猛,已经成长为我国能源结构中的重要组成部分。截至2024年6月,风电和光伏发电装机总规模达到11.8亿kW,已超过煤电装机(11.7亿kW),占全国电力总装机的38.44%。如果再加上水电等可再生能源,我国清洁能源发电装机占总装机的58.2%。就这样,由于取代煤炭,清洁能源消费比重快速升至26.4%,实现了生态位的跃迁^[27]。展望未来,随着政策的持续支持和技术不断进步,新能源发电将占据越来越重要的地位,在能源供应中占有更大市场,从而获得更高的生态位。

3 工程生态视野中能源互联网的层次结构

在自然生态中,从个体、种群、物种、群落直到自然生态整体的层次性是鲜明的。每一个高级层次群体都由数量众多的低级层次组合而成。与此类似,能源互联网也是有层次的。可从微观-中观-宏观三个尺度(层次)及其相互联系、相互作用中加以研究。

3.1 对能源互联网“微观”层面的认识

任何工程生态,均发端于微观。能源互联网的微观层面经常表现为工程个体,例如分布式能源站点(如太阳能、风能、天然气、热能)、能源存储设备(如电池、蓄热、储氢装置)、能源转换设备(如电力电子设备)。在一定范围内,可通过局域网将这些工程个体加以连接,实现对能源的优化配置。

从微观层面看,综合能源园区是一个能源管理的典型。它以园区为单位,通过建立能源智能微网,集连接电能、天然气、分布式光伏、地源热泵等,实现供能侧的多源互补和用能侧终端一体化,满足绿色低碳、安全高效发展的要求。居住建筑能源微网也是个好的案例。目前居民所需的电能、热能、燃气,各自独立,缺少关联,而建筑能源微网可将相关用能电气化,从而做到不同性质的用能互补调剂。随着分布式光伏与建筑的结合,用户将会拥有自己的电源,从

能源消费者转变为“能源生产者”,并参与市场交易。这样有助于打破垄断,促进竞争。在具体实践中,能源互联网中的应用场景十分广泛,由于与人工智能相融合,不断推广智慧生产、智慧营销、智慧巡检、智慧管理技术,将有效改善营商环境和提高生产管理水平。实践证明,良好的微观基础,对于建设坚强的能源互联网是十分重要的。

3.2 对能源互联网“中观”层面的认识

能源互联网中观层面,一方面指能源行业内部的整合,形成产业集群以及与其他行业的关联;另一方面指能源互联网与所在“地域”的关系。

从行业角度看,能源互联网是推动能源系统本身变革的重要力量。通过电力系统(包括分布式能源)、热力系统、燃气系统、氢气系统的相互连接和协同运行,可实现能量互补和信息共享,从而提高整个能源系统的可靠性。能源互联网与其他行业联系也很密切,其生产和运营离不开制造、信息与电子等行业的支持,同时又促进了相关行业的发展。目前全球共有150多家风力发电机组装配厂处于运营状态,其中100余家位于中国,占全球合计产能的60%。得益于上下游的企业聚链成群效应,产品价廉物美。另据PVBL实验室发布的“2023年全球光伏100强品牌榜单”,有90个品牌来自中国,遥遥领先于其他国家^[28]。

从地域角度看,发展能源互联网有助于地方经济结构的升级。新能源产业(如风电、光伏)为地方带来新的经济增长点,吸引资金,提供更多的就业机会。例如,张北县在着力发展风、光等新能源产业,全力打造全国新能源产业示范区核心区的同时,将风、光作为拉动就业的有力抓手,直接或间接带动就业达1万余人^[29]。能源互联网的建设也有利于地方能源结构的优化,降低用能成本,提高竞争力。例如,河北省香河县整县屋顶铺设光伏,年光伏发电约2070万kWh,创造经济价值300余万元。同时,该县的农村居民可以利用屋顶收取持续、稳定的租金收益,工商业企业可以使用绿电,按一定折扣电价使用电能,并将多余电力并入电网^[30]。此外,通过输电(如哈密至重庆特高压输电)工程建设,可把相关省市紧密地联

系起来, 实现优势互补。

综上所述, 能源互联网的发展, 无论对一个行业, 还是对一个区域, 都发挥了重要作用。据《2024国家能源互联网发展年度报告》披露数据显示, 能源互联网行业快速发展, 相关企业数量从2022年的216626家增加到2023年的324584家, 其中上市企业数1678家, 总市值达25.73万亿元^[31]。研究分析表明, 由于能源互联网的发展, 不但使我国能源系统开创发展的新局面, 支持了地方经济的转型升级, 而且催生出特有的工程生态。

3.3 对能源互联网“宏观”层面的认识

能源互联网对我国经济社会的影响是多方面的。一是推动能源结构的优化。有助于可再生能源的快速发展, 替代化石能源, 减少对外依存度, 提升能源安全水平。二是利于改善环境。通过对能源生产与消费进行智能化管理, 能够最大限度地提高能源利用效率, 减少对煤炭等高碳能源的需求, 从而有助于减少温室气体排放和应对气候变化。三是促进经济增长。随着清洁能源的普及和能源互联网的发展, 将形成一个巨大的产业链, 为我国经济增长提供了新动力。新能源汽车、锂电池、光伏产品成为我国出口的“新三样”就是最好的说明。四是影响政府制定发展可再生能源的政策。众所周知, 国家为推动可再生能源发展出台全方位、多层次的法律法规, 涵盖了发展规划、技术创新、消纳机制、投资力度和政策监管等多个方面。这些举措的实施有力地推动了我国可再生能源装机规模的扩大和利用水平的提升, 为实现碳达峰碳中和目标提供了有力的支撑。

在国际层面, 能源互联网的影响也是深远的。一是为跨国能源传输创造更好条件, 促进世界清洁能源的大规模开发和利用, 推动全球能源结构转型和经济绿色可持续发展, 从而可有效应对气候变化。二是能源互联网对地缘政治产生重大影响。跨国能源运输管道和网络经过不同国家, 不但涉及其经济发展也会激化地缘政治风波。例如, 在2022年9月, 俄乌冲突期间, “北溪”天然气管道发生爆炸, 导致俄罗斯对欧洲天然气输送大幅减少, 引起了能源市场的重大恐慌, 加剧有关国家的政治冲突^[32]。三是能源互联网

助推产业革命。正如煤炭和蒸汽机的广泛应用催生了第一次工业革命、石油和内燃机的开发以及电力的普及导致第二次工业革命一样, 近年向可再生能源转型及能源互联网的建设, 将支持新的产业革命的兴起。

3.4 能源互联网中微观、中观、宏观层次结构的联系及其互动关系

在研究工程时, 虽然许多人往往仅把工程理解为“微观的项目”(“狭义的工程”), 但实践要求我们不应把工程和工程生态局限在微观层次, 而应涵盖“微观、中观、宏观”三个层次范围(“广义的工程”)^[33]。如上所述, 能源互联网也具有微观层次、中观层次和宏观层次, 且三者可以相互贯通、相互作用。经验证明, 有些重大事件往往是发端于微观, 集聚至中观, 影响到宏观。

以能源互联网为例, 其发展也表现出微观、中观和宏观层次三者的相互贯通、相互作用。美国学者杰里米·里夫金(Jeremy Rifkin)于2011年在其所著的《第三次工业革命》^[34]中预测到可再生能源与能源互联网的结合将推动第三次工业革命的到来。他认为第三次工业革命应有五大支柱。其一是向可再生能源转型, 其二是将每座建筑转化为微型发电厂, 其三是发展储能装置, 其四是建立能源互联网, 其五是发展新能源汽车。里夫金的杰出之处就在于见微知著, 富有想象力, 将微观问题(将每座建筑转化为发电厂、发展储能装置、新能源汽车)、中观问题(向新能源转型、建立能源互联网)、宏观问题(第三次工业革命)紧密联系起来, 把能源系统中的微观变化上升到战略问题开展大跨度研究, 进而推断出未来的发展趋势。对此, 他在书中曾写道:“20世纪90年代中期, 我忽然明白通信和能源这种新的结合方式即将出现。互联网和可再生能源将结合起来, 为第三次工业革命创造强大的基础。在新时代, 数以亿计的人们将在自己家里、办公室里、工厂里生产出自己的绿色能源, 并在‘能源互联网’上与大家分享, 就像现在我们在网上发布、分享消息一样……”仔细分析他的话就可明白, 只有可再生能源和互联网结合起来, 建立起新型的能源互联网, 才能成为影响世界的“大气候”, 取代传统化石能源, 推动新的能源革命。多少年过去

了, 尽管“第三次工业革命”这一说法未被广泛认可, 但里夫金预测的可再生能源及其能源互联网却出现了迅猛发展的态势。事实证明里夫金是有远见的, 他观察问题的方法无疑是正确的。

综上所述, 任何工程(事物)的微观、中观、宏观层面的变化发展都不是孤立存在的, 而是相互联系的。因此, 要理解微观和中观就必须把握宏观, 反过来也是一样。工程生态中微观、中观、宏观三个层次之间存在着丰富的相互联系、相互影响和相互作用。多年的实践说明, 能源的微观变革已经影响到中观经济发展乃至国家的宏观决策, 而国家宏观的“大气候”以及高层决策又反过来影响能源系统的中观和微观层面的发展, 并呈现三个层次的交互循环。在这种循环当中, “网络”(能源网络与信息网络)起到了十分重要作用, 它将能源系统的各种要素关联起来, 极大地提升了系统中物质、能量及信息的流转速度并显著扩展了流转空间, 进而推动了能源系统的各个环节的高效运转^[35]。这样, 在能源互联网中, 微观个体成为中观乃至宏观生态的组成和演化单位, 同时宏观生态的存在也变成中观和微观生态存在和演化的前提。如此一来, 某些“局域”事件有可能很快转变为“全局”事件, 从而发挥“牵一发而动全身”的作用。反过来, 任何宏观层面的变化, 都会迅速直达每个局

部而发挥统摄性作用。这就是说, 要从微观层次迈向中观层次, 从中观层次迈向宏观层次, 然后再返回中观和微观, 从而在微观-中观-宏观相互作用中把握工程生态。

4 结语

本文基于工程生态论, 运用工程生态新思维方式对能源互联网进行了再认识, 形成了新的见解, 即能源互联网具有多样性、包容性、开放性、适应性、互动性、平衡性、韧性、确定性和不确定性、内生力量驱动的进化性, 在时空分布上同时具有聚集性和分散性, 不同种类能源的生态位具有变迁性等特征。在此基础上, 本文还从微观、中观和宏观三个层次对能源互联网生态进行了深入分析: 即能源互联网中的工程个体、能源互联网与产业(地域)的关系、能源互联网与国家(全球)经济社会的关系。分析表明, 能源的微观变革已经影响到中观经济发展乃至国家的宏观决策, 而国家宏观的“大气候”以及高层决策又反过来影响能源系统的中观和微观层面的发展, 并呈现三个层次之间的交互循环。值得注意的是, 本文主要从工程生态论视角去重新认识能源互联网, 如何利用工程生态论去指导能源互联网发展的相关分析较为欠缺, 也是下一步的研究方向。

参考文献

- [1] 王永真, 张宁, 关永刚, 等. 当前能源互联网与智能电网研究选题的继承与拓展[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(4): 1-7.
Wang Y Z, Zhang N, Guan Y G, et al. Inheritance and expansion analysis of research topics between energy internet and smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(4): 1-7.
- [2] 徐双庆, 张哲, 张绚. 我国能源互联网产业发展形态与路径分析研究[J]. 中国工程科学, 2024, 26(3): 164-175.
Xu S Q, Zhang Z, Zhang X. Development patterns and paths of China's energy internet industry[J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(3): 164-175.
- [3] 国家能源局. 国家能源局2024年三季度新闻发布会文字实录[EB/OL]. (2024-07-31). https://mp.weixin.qq.com/s/y0vnlGuv9HUd8A_npzq1AQ.
National Energy Administration. Transcript of the National Energy Administration's Press Conference for the Third Quarter of 2024[EB/OL]. (2024-07-31). https://mp.weixin.qq.com/s/y0vnlGuv9HUd8A_npzq1AQ.
- [4] 刘振亚. 全球能源互联网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
Liu Z Y. Global Energy Internet[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2015.
- [5] 张妍. 产业生态学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2023.
Zhang Y. Industrial Ecology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2023.
- [6] 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 Y B, Chen G P, He J B, et al. Building a new electric power system based on new energy sources[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 61-69.
- [7] 晓枫哥. 能源互联网, 五年[J]. 区域治理, 2019(20): 65-70.
Xiao F G. Energy internet, five years[J]. Regional Governance, 2019(20): 65-70.
- [8] 姜兆宇, 贾庆山, 管晓宏. 多时空尺度的风力发电预测方法综述[J]. 自动化学报, 2019, 45(1): 51-71.
Jiang Z Y, Jia Q S, Guan X H. A review of multi-temporal-and-spatial-scale wind power forecasting method[J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(1): 51-71.
- [9] 孙宏斌. 能源互联网[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
Sun H B. Energy Internet[M]. Beijing: Science Press, 2020.
- [10] 国家电投集团广西公司: 向"新"而行, 赋能绿色发展[N]. 人民日报, 2024-07-16.
State Power Investment Corporation Guangxi Branch: Striving for the "New" and empowering green development[N]. People's Daily, 2024-07-16.
- [11] 北极星智能电网在线. 国家电网 AI 调度员上岗 保障电力可靠供应、电网安全稳定[EB/OL]. (2024-08-20). <http://www.chinasmartgrid.com.cn/news/20240820/656108.shtml>.
Polaris Smart Grid Online. State Grid AI dispatchers take office to ensure reliable power supply and grid safety and stability[EB/OL]. (2024-08-20). <http://www.chinasmartgrid.com.cn/news/20240820/656108.shtml>.
- [12] 侯琳英. 一座油田的能源转型探索[N]. 人民日报, 2024-10-23(8).
Hou L L. Exploration of energy transformation in an oilfield[N]. People's Daily, 2024-10-23(8).
- [13] 张金梦. 江苏同里: 打造先行先试的新能源小镇"样板"(寻找最靓低碳城市"名片"系列报道(一))[N]. 中国能源报, 2021-03-29.
Zhang J M. Tongli, Jiangsu: Creating a pilot new energy town model (series report on seeking the most beautiful low-carbon city "Business Card"(I))[N]. China Energy News, 2021-03-29.
- [14] 卓振宇, 张宁, 谢小荣, 等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(9): 171-191.
Zhuo Z Y, Zhang N, Xie X R, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-191.
- [15] 读特新闻. 探访"低碳样板" | 未来大厦: 一座"能生长、会呼吸"的"垂直森林"[EB/OL]. (2024-10-18). <https://news.qq.com/rain/a/20241018A096SX00>.
Dute News. Exploring the "low-carbon model" | Future Tower: A "vertical forest" that "grows and breathes" [EB/OL]. (2024-10-18). <https://news.qq.com/rain/a/20241018A096SX00>.
- [16] 马少超, 范英. 能源系统低碳转型中的挑战与机遇: 车网融合消纳可再生能源[J]. 管理世界, 2022, 38(5): 209-223, 239.
Ma S C, Fan Y. Challenges and opportunities in the low-carbon transformation of energy systems: Utilising renewable energy through a vehicle-to-grid model[J]. Journal of Management World, 2022, 38(5): 209-223, 239.
- [17] 环球网能源频道. 揭秘中国首个可再生资源"碳中和"园区的"智慧基因"|探寻零碳园区/村镇系列报道⑤[EB/OL]. (2021-08-13). <https://energy.huanqiu.com/article/44Kwxs6QurY>.
Global Times Energy Channel. Uncovering the "smart genes" of China's first renewable energy "carbon-neutral" park | Series report ⑤ on exploring zero-carbon parks/villages[EB/OL]. (2021-08-13). <https://energy.huanqiu.com/article/44Kwxs6QurY>.
- [18] 中国政府网. 三峡电站投产发电 20 年累计发出清洁电能超 16000 亿千瓦时[EB/OL]. (2023-07-11). https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202307/content_6891037.htm.
China Government Network. The Three Gorges Power Station has generated over 1.6 trillion kWh of clean electricity in 20 years of operation[EB/OL]. (2023-07-11). https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202307/content_6891037.htm.
- [19] 深圳特区在线. 深圳虚拟电厂总容量快速增长[EB/OL]. (2024-09-10). https://www.sz.gov.cn/cn/xxgk/zfxgj/zwdt/content/post_11547654.html.
Shenzhen Special Economic Zone Online. Rapid growth in total capacity of Shenzhen's virtual power plant[EB/OL]. (2024-09-10). https://www.sz.gov.cn/cn/xxgk/zfxgj/zwdt/content/post_11547654.html.
- [20] 南平市人民政府办公室. 新中国 60 年交流输电技术: 从 110 千伏到 1000 千伏[EB/OL]. (2009-09-18). <https://www.np.gov.cn/cms/html/npszf/2009-09-18/1314479948.html>.
Office of the Nanping Municipal People's Government. 60 years of AC transmission technology in New China: From 110kV to 1000kV[EB/OL]. (2009-09-18). <https://www.np.gov.cn/cms/html/npszf/2009-09-18/1314479948.html>.

- [21] 中国日报中文网. 创维光伏全新组件重磅推出, 以中国"智"造助力美好生活![EB/OL]. (2024-04-26). <http://cn.chinadaily.com.cn/a/202404/26/WS662b62fba3109f7860ddb34a.html>.
China Daily Online. Skyworth photovoltaic launches new components, empowering a better life with China's "intelligent" manufacturing![EB/OL]. (2024-04-26). <http://cn.chinadaily.com.cn/a/202404/26/WS662b62fba3109f7860ddb34a.html>.
- [22] 李立涅, 蔡泽祥, 唐文虎, 等. 透明电网理论框架与关键技术[J]. 中国工程科学, 2022, 24(4): 32-43.
Li L C, Cai Z X, Tang W H, et al. Theoretical framework and key technologies of transparent power grid[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(4): 32-43.
- [23] 许传博, 刘建国. 氢储能在我国新型电力系统中的应用价值、挑战及展望[J]. 中国工程科学, 2022, 24(3): 89-99.
Xu C B, Liu J G. Hydrogen energy storage in China's new-type power system: Application value, challenges, and prospects[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(3): 89-99.
- [24] 谢小荣, 马宁嘉, 刘威, 等. 新型电力系统中储能应用功能的综述与展望[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(1): 158-169.
Xie X R, Ma N J, Liu W, et al. Functions of energy storage in renewable energy dominated power systems: Review and prospect[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 158-169.
- [25] 卢媛迪. 坚持创新驱动 支撑新型电力系统建设[N]. 国家电网报, 2022-07-13.
Lu Y D. Adhering to innovation-driven development to support the construction of a new type of power system[N]. State Grid News, 2022-07-13
- [26] 国家能源局. 中华人民共和国可再生能源法[EB/OL]. (2005-02-28). http://www.nea.gov.cn/2011-09/30/c_131060257.htm.
National Energy Administration. Renewable energy law of the People's Republic of China[EB/OL]. (2005-02-28). http://www.nea.gov.cn/2011-09/30/c_131060257.htm.
- [27] 人民网. 11.8亿千瓦!我国新能源发电装机规模首超煤电[EB/OL]. (2024-07-24). <https://mp.weixin.qq.com/s/oYhCYcw6gZeUMcodZ0p-JQ>.
People's Network. 11.8 billion Kilowatts! China's installed capacity of renewable energy generation surpasses coal-fired power for the first time[EB/OL]. (2024-07-24). <https://mp.weixin.qq.com/s/oYhCYcw6gZeUMcodZ0p-JQ>.
- [28] 匡继雄. 中国"风光"产业 在全球市场风头甚健[N]. 证券时报, 2024-03-07.
Kuang J X. China's "wind and solar" industry is thriving in the global market[N]. Securities Times, 2024-03-07.
- [29] 中工网. "风光"云服务照亮就业无限"风光"[EB/OL]. (2023-04-18). <https://www.workercn.cn/c/2023-04-18/7807162.shtml>.
China Workers' Network. "Renewable energy" cloud services illuminate boundless employment "prospects"[EB/OL]. (2023-04-18). <https://www.workercn.cn/c/2023-04-18/7807162.shtml>.
- [30] 新华网. 2023全国乡村振兴案例征集选编|河北廊坊: 香河整县光伏 助力农村绿色发展[EB/OL]. (2023-10-20). http://xczx.news.cn/2023-10/20/c_1212290980.htm.
Xinhuanet. 2023 national rural revitalization case collection and compilation | Langfang, Hebei: Xianghe County's photovoltaic project promotes rural green development[EB/OL]. (2023-10-20). http://xczx.news.cn/2023-10/20/c_1212290980.htm.
- [31] 中国电力报. 《2024国家能源互联网发展年度报告》发布[EB/OL]. (2024-06-29). <https://mp.weixin.qq.com/s/NVt8XEpD8Kb7pDhvkAGqBA>.
China Electricity News. "2024 Annual Report on the Development of National Energy Internet" released [EB/OL]. (2024-06-29). <https://mp.weixin.qq.com/s/NVt8XEpD8Kb7pDhvkAGqBA>.
- [32] 新京报. "北溪三条管线遭到前所未有的破坏", 爆炸画面 → [EB/OL]. (2022-09-28). <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1745226638880544035&wfr=spider&for=pc>.
Beijing News. "Unprecedented damage to the three nord stream Pipelines," Explosion footage → [EB/OL]. (2022-09-28). <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1745226638880544035&wfr=spider&for=pc>.
- [33] 李伯聪, 王楠, 傅志寰. 工程生态研究: 社会与时代的呼唤[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2023, 15(5): 365-377.
Li B C, Wang N, Fu Z H. On engineering ecology: A call of the society and the times[J]. Journal of Engineering Studies, 2023, 15(5): 365-377.
- [34] 杰里米·里夫金. 第三次工业革命: 新经济模式如何改变世界[M]. 张体伟, 孙豫宁, 译. 北京: 中信出版社, 2012.
Rifkin J. The Third Industrial Revolution[M]. New York: St. Martin's Press, 2011.
- [35] 王大洲, 范春萍. 工程生态: 内涵分析与研究进路[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2023, 15(5): 378-389.
Wang D Z, Fan C P. Engineering ecology: Conceptual analysis and research approach[J]. Journal of Engineering Studies, 2023, 15(5): 378-389.

An Analysis on the Energy Internet from the Perspective of Engineering Ecology

Fu Zhihuan^{1*}, Gao Feng², Tong Yibin³

1. China National Railway Group Co., Ltd., Beijing 100080, China;

2. College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China;

3. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

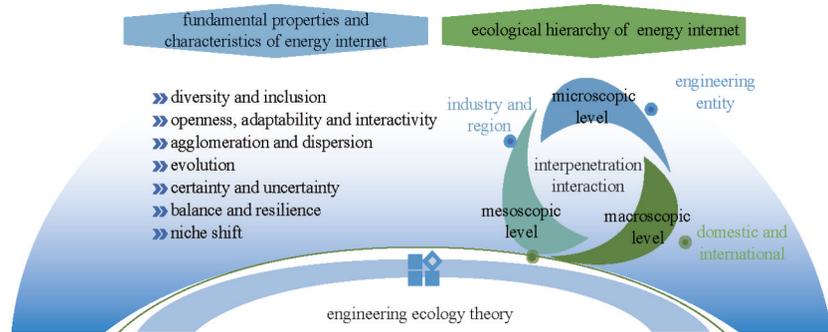
Highlights

The evolution from traditional energy network to the energy internet is analyzed.

The fundamental properties and characteristics of the energy internet are analyzed based on the engineering ecology theory.

The ecological hierarchy of the energy internet is described from the microscopic level, mesoscopic level and macroscopic level, respectively.

Graphical Abstract



Abstract: The development of renewable energy in China shows strong growth nowadays. Specifically, the installed capacity of renewable energy reached 1.653 billion kW by the end of June 2024, a year-on-year increase of 25%, accounting for approximately 53.8% of the total power installed capacity. In addition, a series of key technological breakthroughs have been made, such as the continuous improvement in photovoltaic cell efficiency and the ongoing reduction in costs, providing strong support for large-scale applications. New models and business forms are constantly emerging, such as large-scale wind and solar bases, integrated wind-solar systems, photovoltaic desertification control, "agriculture + photovoltaics", and renewable energy-driven hydrogen production, which have driven the diversified development of the renewable energy industry. The development of renewable energy in China not only provides energy security for China's modernization process but also contributes Chinese wisdom and Chinese products to the global development of renewable energy and the green low-carbon transition. Therefore, how to better build China's energy ecosystem and how to develop the energy internet require in-depth research from the perspective of engineering philosophy.

This paper re-examines the energy internet using a new engineering ecological thinking approach. It defines the energy internet as a system with broad ecological characteristics, composed of diverse and heterogeneous elements and members. The energy internet is characterized by diversity, inclusivity, openness, adaptability, interactivity, both agglomeration and dispersion, as well as both determinism and uncertainty, balance, and resilience. The functionality of the energy internet continuously reflects its evolving nature, driven by endogenous forces. Moreover, the ecological niche of different types of energy within the energy internet is constantly changing, showing a dynamic quality. The paper also analyzes the energy internet ecology from three levels: micro, meso, and macro. At the micro level, the energy internet is represented by individual engineering entities, such as distributed energy stations, energy storage devices, etc. These entities can be interconnected within a certain range through local area networks to optimize the allocation of energy. At the meso level, the energy internet serves as an important force driving the transformation of the energy system itself and contributes to the upgrading of local economic structures. At the macro level, the energy internet has a multifaceted impact on China and the whole world, including optimizing the energy structure, improving the environment, promoting economic growth, and so on.

Keywords: energy internet; engineering ecology; ecological thinking; multi-energy integration; cyber-physical system