

## 行业前沿

电力即算力，  
能源数字化转型势不可挡

■孙艺新

“十四五”规划和2035年远景目标纲要出台以来，“立足新发展阶段、贯彻新发展理念、构建新发展格局、实现高质量发展”明确了新发展阶段的发展脉络。特别是在落实“双碳”目标与构建新型电力系统的双重驱动下，能源革命的系统性、全局性、复杂性、紧迫性被摆在了前所未有的高度，能源供给模式、消费模式将迎来重塑与变革，亟需丰富能源认识论与方法论。笔者认为，用能源数字经济可以概括新经济形态的演进，抓住新基础、新价值、新产品、新市场、新机制五大创新要素的内涵与驱动路径，是抓住发展新机遇和产业发展新机会的关键。

## 挑战：解决协同发展、要素市场化配置等问题

能源系统在新发展理念下需要妥善解决安全、经济、绿色协同发展的问题。目前大家已普遍认识到能源发展存在着“不可能三角”的问题，能源系统的安全性、可用性的经济性、清洁绿色要求难以兼顾，实际上是过去投资拉动的重资产运营的发展模式走到瓶颈，必须依靠新发展理念，借助数字经济优势实现高质量发展。

能源系统在新发展格局下需解决整体与局部、集中式与分布式发展的统一问题。目前对新型电力系统的关注主要集中在两点：一是坚持集中式与分布式并举，两者衔接之处需要数字化“润滑”；二是新能源发展不仅需要规模增长上的量变，还需要质变，即新能源机组对电力系统调频、惯量应有贡献。

能源系统在高质量发展下需解决要素市场化配置并实现融合创新的问题。电网作为电力资源优化配置的平台，要利用各类生产要素，将传统电网基础设施与数字新型基础设施融合，成为输出电力、算力、智力的能源新型基础设施。期间，电网功能形态、企业组织形态均需改变，为现代经济体系建设赋能。

发展能源数字经济是应对上述三大挑战的必由之路，其创新发展的基本方向可

概括为：市场经济+系统观念下的能源数字化转型。坚持“有效市场与有为政府相结合”是基本的理论前提，数字化转型是突破传统发展模式的关键。在定义上，能源数字经济是以新发展理念为引领，以能源技术和数字技术融合应用为重要推动力，以数据作为关键生产要素，以现代能源网络和信息网络为主要载体，不断提高能源行业全要素生产率，推动能源实现高质量发展的新经济形态。

## 路径：基础、价值、产品、市场、机制创新

一般认为，发展能源数字经济应从能源产业数字化和数字产业化两大领域发力，但长期以来，刻画其创新的内在驱动力、研判创新方向与行动路径则缺乏深入研究。对此，笔者提出，基础、价值、产品、市场、机制五大要素创新将有助于找到能源与数字技术融合并进的内在逻辑，并研判未来发展趋势。

**新基础：电力、算力基础设施融合发展。**电力在终端能源的占比已超过80%，未来能源形态是电力与算力融合形态，电网将在输送电力的同时，充分考虑算力发展需求。一方面，目前数据中心耗电量尚不超过全社会用电量的2%，未来即使需求量增长加倍，但总体上供电压力不大；另一方面，电力即算力，电力的分布式生产、消费与远距离大规模输送等功能形态均能同步加载算力资源，实现资源复用与时空优化。电网的平台枢纽功能将在电力+算力时代得到进一步丰富，电力+北斗、电力+5G、电力数据中心对外服务等利用模式可充分响应用户对算力、电力的双重需求，重构新型能源基础设施功能形态与价值形态。

**新价值：能源大数据赋能现代产业体系建设。**能源数字经济的价值在于数据驱动的价值，不仅体现在服务能源产业链供应链发展方面，还体现在提高产业协同互动能力上，这对“双碳”目标实现与治理现代化均具有重要的促进作用。以交通运输电力指数(TEI)为例，综合铁路、公路、航空、水运、邮政、仓储等活动的用电量，可



智能巡检机器人

超前反映实体经济活跃度。同时，挖掘疫情前后产业链用电情况变化，可有效发现产业链短板。此外，制造业各环节的用电量分析，有助于综合判断产业链健康度与韧性。

**新产品：数字能源具有三个层面价值。**能源数字经济将产生新的能源产品形态，即数字能源，如同虚拟电厂不是“看得见”的电厂，数字能源也不是“数字态”的能源，其数字属性有三个层面：一是对能源生产消费注入数字化平台技术，使供需双方更快速匹配与互动，即数字能源的平台价值；二是用算法、算力、数据实现对能源供需的重构，开发出新的交易品种，即数字能源的产品价值；三是进一步拓展数字能源的金融市场属性，成为新的统一衡量尺度，改变数字时代能源的计价方式。即用数字能源作为衡量用能水平的评价尺度，从而建立虚拟市场与现实世界的映射关系。

**新市场：电力市场+碳市场+能源数据市场。**电力市场与碳市场建设是典型的“有效市场+有为政府”的结合，其中，对碳

交易、配额的初始分配、定价机制、参与主体范围及与电力现货市场结合等问题都需充分计量、仿真、预测，随即衍生出一个为电力交易、碳交易服务的能源数据市场，三个市场的有机结合是落实“双碳”目标的有力手段。

**新机制：数字技术赋能制度创新与能源金融创新。**市场运营需要多方主体积极参与，一方面，需要建立具有吸引力的激励机制；另一方面，需要建立多方信任的互信机制。如采用区块链技术的分布式能源交易机制，能将分布式、公平性等特点契合新型电力系统下源网荷储各环节的业务需要。此外，在电力征信等新兴业务领域，也需要金融科技+大数据+区块链等技术的跨界应用。可以预见的是，未来的能源数字经济生态圈将是一个能吸引能源圈以外的数学家、金融从业者等人士参与的大舞台。

## 方向：产品创新、用户市场培育、算力布局等将全面铺开

创新总是从边缘开始，能源数字经济将从四个细分领域加快发展：

**瞄准尖峰负荷供需矛盾的数字化能源产品创新。**从需求的痛点程度来看，数字能源产品开发能够产生用于尖峰用能的市场。目前，3%的尖峰负荷持续时间一般不超过30小时，5%的尖峰负荷持续时间一般不超过100小时。随着以新能源为主体的新型电力系统“双高”“双峰”特征进一步凸显，传统的冗余建设模式因边际收益递减而愈发难以以为继。其设计要点包括：在尖峰时期以市场化手段调用社会中小微型供电设施和基于区块链技术设计配网凭证交易产品和制度模式；通过电力大数据分析预测，实现交易市场价格规模监测；配网交易数据可进一步推动金融创新、辅助电网规划。

**瞄准隔墙售电市场的用户市场培育。**补贴退坡后市场经济发挥作用是资本看好新能源赛道的重要原因，创新则成为新能源产业链不断升级的驱动力。如隆基集团产能成本优势策略、通威集团“渔光一体”模式、清能股份重卡突破路线均是在市场竞争中涌现的新模式、新路径，未来围绕隔墙售电市场也将孕育出新商机。目前尚难以预测一个社区中愿意参与双向互动的“产消者”的规模，但可以判断的是，“灵活性电源+光伏”为代表的多能互补模式将有更大的发展空间。当然，前提是坚持以“为用户创造更多价值”为基本点，从用能场景与便利性方面加强设备可用性、易用性设计。

**瞄准“东数西算”市场的算力电力布局。**一方面，部分电力负荷空间转移，有利于缓解西部、北部清洁能源消纳问题；另一方面，数据中心在线负载具备空间转移灵活性，离线负载具备时间转移灵活性，两类负载都具备需求侧响应潜力。预计到2025年，数据中心市场规模将达6000亿元。契合“双碳”目标，未来东部数据中心、西部算力中心的战略价值将充分显现。

**瞄准制造业转移城市的“碳犀牛”风险预警。**要关注东部制造业城市的能源转型，充分发挥市场的引导作用，健全全国统一碳市场交易机制和运行规则，推动不同区域、不同行业、不同水平的企业能够公平发展。对此，笔者提出“碳犀牛”问题，旨在认识各种风险叠加与防控问题：一是产业结构失衡风险，警惕“高新”产业产能过剩与传统高耗能产业中“劣币驱逐良币”的问题；二是区域结构失衡风险，警惕自上而下层层分解带来的区域割裂风险；三是能源系统叠加风险，警惕新能源发展“重数量、轻质量”带来的安全稳定风险；四是金融系统叠加风险，警惕由产业、能源系统的不确定性传导到金融系统后带来的投融资信贷风险。

(作者供职于国网能源研究院有限公司)

## 数字电网

## 新型电力系统建设离不开数字化加持

■黄丽娟

碳达峰、碳中和是我国向世界作出的庄严承诺，也是一场广泛而深刻的经济社会变革，绝不会轻易实现。3月15日，中央财经委员会第九次会议指出，“十四五”是碳达峰的关键期、窗口期，要构建清洁低碳安全高效的能源体系，控制化石能源总量，着力提高利用效能，实施可再生能源替代行动，深化电力体制改革，构建以新能源为主体的新型电力系统。因此，要推动电力系统规划工作积极转型，适应新型电力系统构建要求。

## 将与其他能源系统进行能量和数字交互

新型电力系统是以数字化推动，高比例新能源、高比例电力电子装置、低转动惯量、强随机性的电力系统，源网荷储间通过电力流和信息流形成有机整体，并与其他能源系统进行能量和数字交互。从源网荷储四个环节看，均出现新变化：

**电源侧：**电源装机规模倍增至负荷需求增长，电源结构以新能源为主体；电源出力间歇性、波动性加剧；电源布局更多元，电力电子装置高比例渗透。

**电网侧：**电网规模需持续扩大。结构上，主电网进一步加强省区互联；配电网将逐步演变为有源配电网，向交流直流混合柔性电网+智能微电网等多种形式协同发展；主配网界限进一步模糊。电网复杂化，潮流概率化、电网利用率下降，电网由单纯的电力输送通道向能源综合利用平台转型。同时，电网发展以数字技术为驱动，依托强大的电力+算力，使电网具备超强感知能力、智能决策能力和快速执行能力。

**负荷侧：**能控双控将高载能行业的用电增长带来不确定性，但新电气化进程将带来电量增量；微网、虚拟电厂、电动汽车等多元负荷形态比例提升；在储能单元加入负荷侧后，部分负荷将具备主动参与系统调节的能力，负荷特性不确定性增大；三产及居民用电比重持续提升，峰谷差和尖峰负荷规模将进一步扩大，对电力供应安全要求更高；用户互动性增强，将积极参与市场交易及系统调节。

**储能侧：**储能规模与新能源、核电发展同频增长。中短期抽水蓄能和化学储能并重，长期随着储能新技术涌现，储能进一步多元化。

## 需重视能耗、排放对负荷发展的限制

电力规划工作是基于对未来一段时期内负荷增长的预判，开展电源供应充裕度分析并提出电源规划方案，随后对负荷和电源的新需求开展网架方案设计，最后对规划网架开展电气校验及经济技术评价。

在新型电力系统下，电力规划对象除传统的源网荷外，还包括储能规划。同时，规划边界进一步扩展，传统规划以电力系统内部数据为主，辅以对经济社会发展数据的研究，而在新型电力系统下，需进一步掌握能耗、碳排放等专业数据。规划流程基本与传统电力系统规划一致，但各阶段都将引入新的技术手段，以应对新型电力系统的新特征。在规划评价方面，评价指标进一步多元，亟需形成新的评价体系，客观衡量新型电力系统规划成效。

其中，在负荷预测方面，更重视能耗、排放对负荷发展的限制，预测出来的最大负荷需经尖峰削减后才能作为后续规划的依据，确定性的负荷预测将逐步向概率化

的预测方法转变。结合地区能耗、排放指标开展大用户用电需求预测，特别是在传统高载能行业比重较大的地区，更要特别重视甄别电解铝、钢铁、化工等大用户投产的可行性，更加慎重对待打着大数据中心名义建立的虚拟货币挖矿项目。要紧密关注工业、建筑、交通等部门碳达峰路径设计，摸清电能替代潜力，开展电能占终端能源消费占比测算，并研究其对电力需求增长的拉动作用。传统预测的最大负荷含有一定比例的尖峰负荷，尖峰负荷持续时间短、频次低、电量少，在新型电力系统下，电源、电网的备用率将显著提升，为了更经济高效地开展电力建设，建议开展弹性负荷、虚拟电厂等灵活调节资源摸底，合理确定削峰比例，将最大负荷进行尖峰削减后，再参与后续的电源需求、电网需求方案设计。

以一个最大负荷5000万千瓦的省份为例，若实现5%的尖峰负荷削减，将减少250万千瓦的煤电机组装机需求。同时，高比例可再生能源分布式接入用户侧将带来多时空不确定性，定量的负荷预测需逐步转变为对包括分布式电源、储能、主动负荷在内的广义负荷的用电需求、负荷特性和互动机理的研究。现阶段对概率化负荷预测的研究和应用程度不足，尚未形成通用可行的方法，这将成为规划领域亟需开展的研究之一。

## 储能等调节电源将扮演关键角色

在电源规划方面，需开展多时间尺度的平衡计算，电源配置上要考虑各类电源定位根本性的改变，含储能在内的调节性电源规划将成为重要内容。不同电源的调节性能不同，火电受限于自身运行机理，水电受限于水能资源，不同的储能技术也对

应不同的调节能力，特别是在以新能源为主体的新型电力系统下，新能源出力波动的随机性强，对各类电源的配置不仅要考虑典型断面下的电力电量平衡，还要进行计及爬坡能力等不同时间尺度下的平衡计算，这也是亟待突破的关键技术。

从电源定位上看，新能源从提供电量补充逐步成为提供电量支撑的主体电源；煤电将转为以提供电力为主、电量为辅的备用保障电源；气电主要作为调节性和保安电源；抽水蓄能将保持削峰填谷、紧急事故备用作用。在新型电力系统下，电源调节能力必须与新能源的接入规模同频增加，抽水蓄能规划、储能电站规划等调节电源规划将成为规划工作的重要内容。

## 首先要解决新能源送出“卡脖子”问题

在电网规划方面，当前亟需加强网架建设，加强网源荷储一体化协同规划，减少新能源送出“卡脖子”，先把被动消纳的问题解决好；中长期将提高电网柔性，逐渐加强电网友好主动接纳能力；在电网校验中着重解决潮流随机等问题。

主电网需进一步强化，特别是加强新能源富集区域的送出网络建设，适时增强省间互联，减少大规模新能源送出受阻及带来的稳定问题。加强新能源整合送出研究，优选新能源汇集站址及技术方案，开展网源荷储一体化协同规划研究。同时，对电网规模增大、潮流随机性增加带来的设备利用率下降问题要提出更多解决方法，如利用柔性交流输电系统等新技术，实现电网潮流控制，减少不必要的网架建设。随着分布式电源和互动用户大量接入，配电网将逐步引入更多的柔性互联设备，实现分布式电源、微网、储

能装置即插即用、友好主动接纳能力。同时，规划工作中要对新能源接入电网的安全标准、消纳考核标准等提出合理建议，推动新能源机组进一步完善涉网技术标准，推动新能源在提高电力系统调节能力方面承担主体作用。

此外，在电气计算方面，潮流分布的不确定性增加，典型方式潮流较传统电力系统显著增大，而常规的潮流计算工具处理随机潮流的效率较低，需逐渐建立高适应性、高灵活性分析的不确定性潮流算法；风光发电大规模替代常规机组将使系统总体有效惯量减小，抗扰动能力降低，电网承受较大潮流波动压力，频率控制难度加大；风光发电机组易大规模脱网，从而引发严重的连锁故障，且电力电子设备大量应用将增加次同步振荡风险。因此，在常规的静态、暂态和动态稳定计算外，还需开展新能源场站接入系统强度评估等稳定评估工作。

在构建新型电力系统进程中主动作为，是电网企业推进碳达峰、碳中和目标落地最直接的方式，规划工作需进一步落地。同时，上述负荷、电源、电网侧规划方式转变需要观念转变、技术创新和数字化提升共同助力才能达成。对此，建议提升规划数字化水平，以处理更多的能耗、碳排放、经济等外部数据，应对数据量激增和数字化电力系统模型表达，打造覆盖全电压等级的数字化电网规划设计平台，构建以数据为核心的智能电网数字化转型全景框架，形成数据流、业务流、人工智能协同的智能电网体系。

同时，大力推动技术创新，加大科技投入和资源配置，对电力规划领域亟待突破的关键问题，如源网荷储协调规划方法、多时间尺度的电力电量平衡、广义负荷预测、柔性互动的配电网规划技术等开展攻关。

(作者供职于广西电网公司电网规划研究中心，系南方电网公司二级技术专家)