

能源互联网价值创造、业态创新与发展战略

唐跃中¹, 夏清^{2,3*}, 张鹏飞⁴, 谭振飞³, 刘宇尘³, 孙冰莹⁵, 汪洋⁵

(1. 国网上海市电力公司, 上海市 浦东新区 200122;

2. 清华四川能源互联网研究院, 四川省 成都市 610213;

3. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京市 海淀区 100084;

4. 国网上海市电力公司电力科学研究院, 上海市 虹口区 200437;

5. 北京清能互联科技有限公司, 北京市 海淀区 100085)

Value Creation, Business Model Innovation and Development Plan of the Energy Internet

TANG Yuezhong¹, XIA Qing^{2,3*}, ZHANG Pengfei⁴, TAN Zhenfei³, LIU Yuchen³, SUN Bingying⁵, WANG Yang⁵

(1. State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Pudong New Area, Shanghai 200122, China;

2. Tsinghua Sichuan Energy Internet Research Institute, Chengdu 610213, Sichuan Province, China;

3. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China;

4. Electric Power Research Institute, State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Hongkou District, Shanghai 200437, China;

5. Tsintergy Technology, Haidian District, Beijing 100085, China)

Abstract: The construction of the energy Internet not only needs support from technical tools, but also needs to activate the participants with value sharing to create a mutually beneficial energy ecosystem. To this end, from the perspective of energy, information, and institutional economics, this paper analyzes the value creation mechanism, business model, and strategic choice of the energy Internet. First, the value creation mechanism is analyzed, of which the essence is to facilitate the resource optimization by breaking boundaries among isolated energy systems, reduce the entropy of the energy system via the information technology, and release economic bonuses through the energy Internet platform. Second, based on the sharing economy, this paper designs the value distribution mechanism of the energy Internet that reduces the trading costs and incentivizes the win-win corporation. This paper also initiates the energy Internet business model of supporting the smart city, green electricity tracking, energy conservation, asset utilization improvement, and high-efficient governance. Finally, the development strategy of the energy Internet is planned to promote the high-quality development of energy Internet, including re-electrification, data sharing, artificial intelligence, intelligent energy consumption, and value sharing.

Keywords: energy Internet; value creation; business innovation;

strategy implementation

摘要: 能源互联网的建设不仅需要技术手段的支撑, 更需要以价值为驱动激活各方主体参与, 打造互惠共赢的能源生态圈。为此, 从能源、信息和制度经济学的视角出发, 深入分析能源互联网的价值创造机理、业态创新范式和发展战略选择。首先, 剖析了能源互联网的价值创造机理, 其本质是以多能融合突破孤立系统的边界, 从而显著扩大资源优化配置的空间; 通过信息技术使得能源系统更加有序, 进而促进能源系统的“熵减”; 通过能源互联网平台释放范围经济的巨大红利。其次, 设计了基于共享经济机制、降低交易成本、激励共享共赢的能源互联网价值分配机制, 谋划了能源互联网支撑智慧城市发展、支撑绿电追踪、支撑能源消费节能降耗、提升工业资产利用率、助力政府治理的新业态。最后, 策划了以再电气化为核心目标、基于价值公平分配的数据共享、以数字孪生为平台的人工智能、以负荷调度替代需求侧响应、基于共享经济的能源互联网市场机制的发展战略。

关键词: 能源互联网; 价值创造; 业态创新; 战略措施

0 引言

中国学术界、产业界和政府对于能源互联网的规模化研究已长达5年, 能源互联网的定义不断扩充完善。如图1所示, 起初, 国内侧重于将能源互联网定义为

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(52094021000A)。
Science and Technology Foundation of SGCC (52094021000A)。

“一种新型电力系统”，由以分布式清洁能源发电为新特征的电力系统和互联网技术深度融合形成，其枢纽为互联网式的电网^[1-3]。经过百家争鸣，国内将能源互联网定义为“一种新型能源体系”，以可再生能源为主要一次能源、以电力系统为核心、以互联网及其他前沿信息技术为基础，与气网、热网及交通网络等紧密耦合而形成^[4]，能实现横向多源互补、纵向源-网-荷-储协调、能量流与信息流双向流动^[5-6]。随着研究的不断深入，目前的主流观点认为：能源互联网的价值及新业态不断发掘和涌现，在“新型能源体系论”基础上，其定义扩充为“一种新的能源经济业态”，基本架构由“能源系统的类互联网化”和“互联网+”组成^[7]，包括多能协同的能源网络、信息融合的能源系统和创新模式的能源运营三个层级^[8]，是互联网与能源生产、传输、存储、消费以及能源市场深度融合的能源产业发展新形态^[9]。

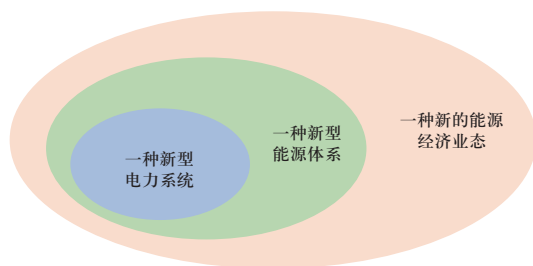


图1 能源互联网概念内涵演变

Fig.1 Evolution of the concept of the energy Internet

由此可知，能源互联网的范畴从电力行业扩展至能源领域，逐步发展为自成体系的能源经济形态和产业生态，其价值创造机理和业态创新引发业内广泛思考。

目前对能源互联网的价值来源的研究有三个角度。一是从能源转型战略的角度，能源互联网的价值在于促进分布式清洁能源的消纳，改变能源的生产与消费模式，支撑能源革命^[10]。二是从能源产业链的角度，能源互联网具备“五位一体”的价值点^[11]，即能源基础设施的互联、能源形式的互换、能源技术数据与信息技术数据的互用、能源分配方式的互济、能源生产与消费商业模式的互利。三是从需求满足的理论角度，能源互联网的新价值来源归为两个方面^[12]：其一是新业务和商业模式创造的市场价值，用于提升用能需求的满足程度；其二是新的生产、管理和交易方式创造的效率价值，本质上是提升用能需求满足过程的效率。能源互联网的价值来源于更好地满足居民生

活以及经济活动的用能需求乃至社会发展的需求。

对于能源互联网的价值创造机理，现有研究探讨可以分为三类。第一类立足能源互联网物理系统层面展开，包括多种能源互补和能源集成优化。多能互补系统借助多能源分析规划技术、能量管理技术、协调控制体系和储能技术^[13]，能源集成优化通过能源耦合关系对多种供能系统开展横向协调优化，以实现各类能源梯级利用和协同调度，均可促进可再生能源的消纳，提高能源利用效率^[14]。这类研究通过模型和推导，定量或定性地论证了关键技术在提高能效方面的价值，但缺乏实现这一价值的机制设计。第二类侧重于能源互联网信息技术层面的分析，包括能源互联网数据的交互、共享与挖掘。能源互联网的内部数据由能源生产、配送和消费系统产生，其外部包括可反映经济、社会、政策、气候、用户特征、地理环境的数据^[15]。从系统运营角度，文献[16]提出为应对供需两侧的随机性，需要充分的信息交互与分析，以提高电力系统稳定性，但未阐明这种交互对市场机制的依赖性；文献[17]认为大数据技术可以提高智能电网管理水平、运营效率和盈利能力。从资源配置角度，文献[18]提出能源互联网设备信息的交互可以提高市场的信息充分度、透明度，缓解能源市场的信息不完全问题，让能源交易接近于社会最优的均衡点，提升能源市场的资源配置效率。然而，现有研究没有从机制的角度设计激励参与者“说真话”的方法。从社会规划及治理角度，能源数据的挖掘实现了能源网络规划与经济社会发展体系的融合^[19]，能够研判社会经济状况、辅助制定社会政策并评价政策实施效果^[20]，但需要全面深入研究能源大数据在政府治理中更加有效的场景。第三类着眼于能源互联网融合创新层面。各主体运用互联网思维创新能源运营模式^[21]，以需求为导向，通过互联网运营与能源多元业务的融合，更好地满足人们的用能需求、提升需求满足过程的效率^[22]。

基于上述能源互联网价值来源与价值创造的发掘，以及一批能源互联网示范工程的落地^[23]，国内进一步展开了能源互联网催生的新业态的研究。

社会对全国能源互联网产业增长的积极预期，促使新业态培育成为能源经济发展的制高点^[24]。有学者认为新业态培育强调“三个理念”，即能源管理理念、信息服务理念和节能减排理念^[25]，其商业模式将由集中式的整体平衡，向分散化决策、帕累托最优的局部微平衡发展^[26]。在“建设具有中国特色国际领先的能源互联网企业”的发展战略下，国家电网有限公司开

展了以综合能源服务、优势资源商业化、新兴产业跨界融合为代表的新业态创新实践,涵盖了市场导向、产品导向和资产运营导向三个维度的商业模式^[27]。

现有文献对能源互联网的业态创新的主要观点包括四个维度。一是促进能源系统清洁低碳化的业态创新,涉及绿色产能和绿色用能两方面。绿色产能即能源生产的低碳化,能源互联网包含的多能替代及存储、转换技术,以支撑能源供给侧的“清洁替代”产业,包括发电侧低碳改造、零碳和消碳技术的发展^[28]。绿色用能可理解为有序用能和节能减排,基于能源互联网的智能云平台可以支持能源大用户节能技术改造、节能量监测、核算和评价^[29],供暖服务商基于多能系统与多能管网组建“虚拟热电厂”,向用户提供清洁取暖方案^[30]。二是提升能源转换及利用效率的业态创新,涉及分布式能源、用户侧储能和园区综合能源等。分布式能源和用户侧储能可通过租赁、虚拟电厂、共享节能收益模式^[31],建立电量共享平台,以提高容量利用率^[32]。园区综合能源可通过数据中心算力、能耗、成本的同步优化、工业余热回收、电池梯级利用、虚拟电厂等,提升能源利用效率^[33];借助信息流“负熵”理念和技术以延缓热力系统的熵增速度^[34],将能源互联网与物联网融合,形成同一智能协同网络即泛能网,开展能源生产、储运、应用及回收的优化控制,提升园区能效^[35]。三是优化能源市场资源配置的业态创新,包括市场体系的完善和市场形式数字化。能源互联网将在能量、碳排放市场等市场建立现货、期货交易相互支撑和耦合的二级市场体系,同时建立碳交易市场、绿币交易市场等衍生交易市场^[36],促进能源资产投资与交易,丰富资源配置手段;能源市场数字化,如能源电商,从垂直封闭的传统模式向开放共享的新模式转变^[37],提高市场配置效率。四是协助能源规划及社会治理的业态创新,涉及能源规划、城市管理和决策。能源规划方面,能源数据运营商可以面向政府规划部门、建设单位提供能源网络规划或改造项目的咨询服务^[38];城市管理方面,车联网联通交通信号系统的路线规划^[39]、交通能源互联网的协同规划与调度^[40]可保障城市智慧交通;社会决策方面,能源互联网共享运营平台可向政府部门提供政策制定和决策支撑、预测宏观经济指数、行业景气指数、社会征信体系建设等^[41]。

诚然,现有研究针对具体的应用场景从技术角度深入分析了能源互联网的价值创造和商业模式。然而,能源互联网价值创造和业态创新的研究应上升到

基于多能融合、新能源发展、数字技术的能源经济学的高度。需要探究能源互联网价值创造的物理与经济学机理,以体制机制和商业模式创新实现能源互联网的价值,策划推动能源互联网建设的战略路径。特别是在中国“碳达峰、碳中和”战略的发展背景下,国家电网有限公司已将推进能源互联网建设作为新型电力系统建设的主要途径,能源互联网已从探索阶段进入全面发展时期,迫切需要系统性地理解能源互联网的价值创造机理、业态创新范式和发展战略选择。为此,从能源经济学的角度,本文将着重分析能源互联网打破孤立系统边界、实现各要素全面互动、获取互联网范围经济红利等方面的价值;揭示能源互联网业态创新的本质是通过多能融合、供需融合、物理信息融合实现了能源产-销-用-储不同环节价值链的贯通与整合,进而开启了更长产业链资源优化配置的新业态;策划能源互联网支撑市场高效交易、价值公平分配、智慧城市、绿电追踪、节能降耗、提升资产利用率、助力政府治理的新业态;谋划能源互联网发展战略,通过再电气化、基于价值分配的数据共享、基于数字孪生的人工智能平台、机制创新与数字技术共同驱动的能源互联网智慧化、用户侧精准调度、基于共享经济的市场机制推进能源互联网建设。

1 能源互联网价值创造

按照美国学者杰里米·里夫金的预测,新能源和互联网技术催生了电网的一种新的物理形态,将其称为能源互联网,其特征是基于可再生能源的、分布式、开放共享的网络;另一方面,互联网的思维实现了原本互相独立的电、气、热系统之间的互联互通。能源互联网已成为能源革命的主要内涵之一,其内在价值归纳如下。

1.1 能源互联网促进了能源系统的“熵减”

能源系统天然地满足“熵增定律”,能源在开发、转化、传输、存储与消费过程中存在着大量能量耗散,而导致熵增。能源系统的效率就体现如何降低熵增的速度、降低能源的耗散速度。能源互联网如何降低熵增的速度?其一,通过多能源融合打破了单一能源系统的封闭性,降低了熵增速度。例如,用户端的综合能源系统产生了能源的梯级利用,减少了能源的耗散而降低了熵增的速度。其二,储能技术使得原本要耗散的能源被存储起来,避免了由于供需不匹配

而产生的能源浪费进而降低了熵增的速度。其三是以低碳能源替代化石能源,减少温室气体排放。其四是使用数字技术极大地降低了能源系统的信息熵,使得能源系统变得更加有序,通过源网荷储高效、精准的互动,产生了协同效应,提升了源网荷储之间的有序性,避免了由于源网荷储之间不协同而产生的弃风弃光,极大降低了能源耗散,进而降低熵增。大量的信息获取与加工,降低了能源互联网运行所面临的不确定性,降低了为应对复杂不确定性而付出的高额投资与运行成本,以轻资产提升重资产的效率。数字技术使得信息流、能量流、资金流充分协同,降低了信息不对称而产生的管理成本;信息流使得能量流与资金流更加高效协同,降低了由于无序性而产生的成本,信息引导着资金投向效益高的项目,信息引导能量向着效益最高的节点流动。

1.2 能源互联网将支撑新能源的汇聚、传输和存储

新能源发电将覆盖在地球上的能量膜转化为电能。随着新能源比例的不断提升,迫切需要电网覆盖的空间范围越来越大,以实现新能源发电的汇聚。由于新能源在空间上的极度不平衡,需要电网将新能源富余地区的电能输送到电力需求大、发电资源缺乏的地域,实现新能源的配送。由于新能源发电在时间上与电力需求的极度不平衡,需要电网具备强大的不同时间尺度的储能能力。实现“双碳”目标的重要途径之一是构建以新能源为主体的新型电力系统,未来能源供给是以新能源发电为主,电网是电能汇聚、传输、配送的平台,储能则是应对新能源发电与电力需求空间与时间上不平衡的关键手段,将成为能源互联网的重要环节。能源互联网将以成熟的输配电网作为新能源输送的载体,实现新能源的聚集、传输和配送。当新能源过剩时,在原火电厂的位置开展“绿电制氢”,当新能源发电不足时,“氢再发电”,由此解决长时间尺度上的电力电量平衡的难题,同时所获得的绿氢也可满足钢铁、化工等行业深度减碳的需求。

1.3 多能融合的本质是实现了资源在更大范围内的优化配置

在能源供给与需求侧,不同能源之间互相替代,以竞争的方式提升了能源供给与需求的弹性。能源的梯级利用也极大提升了一次能源的利用效率。不同能源的供需时序差异性形成了彼此之间的强烈互补协同效益,例如:天然气在冬季供需紧张,而电能

供需紧张,两个能源系统协同则能够产生降低运行成本和投资的巨大效益。不同能源动态变化的时间常数差异极大,如果能够协同控制电转化为热或制冷的过程,不影响供热或供冷效用的前提下,可为电网提供储能(储热)、紧急备用(中断电负荷)的服务,以廉价的方式为电网提供灵活性资源。如果未来的供热都由新能源发电提供,储热将成为消纳新能源发电波动性极为经济的方式。从经济学的角度,多能融合本质是实现了不同能源市场之间的开放,通过能源消费者在不同市场上跨品种、跨区、跨期的交易和套利行为,实现了多能源市场在空间 and 不同时间尺度上的市场均衡,必然提升能源资源在更大时空范围内的优化配置水平。

1.4 数据技术使得能源系统变得更加有序、协同、智慧

第五代移动通信(5G)、物联网、人工智能、云计算、区块链、数据中心等数据技术赋予了能源生产、传输、存储与消费各环节的智能化。这种智能化的本质是能源系统的各要素不但产生功能,而且也提供表征其功能的数据;由于数据之间的交流,实现了各要素之间的协同,通过协同产生了自组织、自趋优、自适应的功能。数据就像语言一样,使得各要素之间能够对话,从而使得整个系统变得更加有序、协同。数据技术能够感知以往能源系统难以获得的信息,能够精准地认知造成能源系统随机性的影响因素,从而降低能源系统面临的不确定性。信息的价值在于降低未来的不确定性产生的预期。人工智能使得人类从物理机理认知世界走向利用大数据认知世界,能源系统变得更加智慧。系统的无序将产生惊人的成本,高效的协同将使得资源更加有效地配置;智慧则是人类感知、记忆、理解、分析、判断、升华等所有能力,能源系统将由于数据技术而获得这样的能力,以应对瞬息万变的新能源。这正是数据技术创造的价值。

1.5 源网荷储高度协同开创了新型电力系统运行的新模式

新型电力系统以新能源发电占主导地位,新能源在不同时间尺度和更大空间范围内的不平衡需要“荷随源动”与大规模储能互动的新型电力系统运行方式。电力市场以不同时间尺度的价格引导电力供需平衡,储能则以套利交易方式“熨平”电力供需在时间

尺度上的不平衡,而这种时变的价格来自于电力市场不同时间尺度交易品种市场均衡价格,市场以反映供需不平衡度的价格引导不同时间尺度的源网荷储互动。电力用户由以往日内削峰填谷的短周期需求响应方式转变为以周、月、季为周期的长时间尺度源网荷储互动。新型电力系统的调度也不再仅仅是调度电源,而将以负荷与储能调度开启新型电力系统源网荷储全面、精准互动的新模式。只有负荷调度意义下的互动,才能够实现电网的供需的双侧调度,才能够极大地降低为消纳新能源而付出的灵活性资源成本,才能全面提升电网设备的利用率。这种价值创造是惊人的,是因为改变了传统电网基于极端电力平衡场景的规划与运行方式,取而代之的是更加有效平衡的方式。

1.6 能源互联网将获取互联网经济的巨大红利

互联网丰富与发展了传统微观经济学的理论与方法,催生了互联网经济。在互联网上,经济主体通过互联网进行生产、交换、分配、消费等经济活动,互联网不仅为经济主体提供了交易活动所依赖的决策信息,而且提供了交易的平台。在这一平台上,所有生产与消费的市场主体聚集在一起,便构建了传统经济学认为最理想的完全竞争市场;在这一市场中的所有市场成员都是价格的接受者,竞争更加充分。在这一平台上,需求的种类、数量、品质直接牵引着生产者,避免了“蛛网振荡”的供需平衡方式,后者可能产生巨大的交易成本或引起严重的生产过剩或不足。在这一平台上,通过远期电子化的市场交易,可以稳定经济主体对商品价格的预期,确保经济活动的平稳性。在这一平台上,支撑市场主体决策的外部信息获取与加工的共享化,可消除由于外部信息不对称而产生的市场主体决策的差异性,确保外部信息获取的公平性,这使得市场主体可集中精力研究如何更好地提供商品和服务,极大地降低了交易成本,凸显了平台经济的优越性。在这一平台上,可创新以互联网为纽带、产权分离、使用权共享的企业,例如虚拟电厂。互联网将不同地点、不同产权、不同功能的需求侧响应资源聚集在一起,类似于电厂一样能够提供调峰、备用,并且以共享经济的模式分配聚合后所创造的价值。在这一平台上,区块链构建了去中心化的信用体系,不可更改的历史信用记录,极大地降低了经济主体违约的风险与由此产生的成本,稳定了经济预期,必然极大地提升交易空间。在这一平台,以经济实体

的用电量反映微观经济活动规律,为政府制定宏观经济政策和产业政策提供科学依据,消除了政府治理过程中可能存在的信息不对称。

2 能源互联网业态创新

能源互联网的价值实现依赖于业态创新。新业态是指“基于不同产业间的组合、企业内部价值链和外部产业链环节的分化、融合、行业跨界整合以及嫁接信息及互联网技术所形成的新型企业、商业乃至产业的组织形态”,信息技术革命、产业升级、消费者需求倒逼是推动新业态产生和发展的三大重要因素。能源互联网的多能融合、供需融合是能源产业间、企业内部与外部价值链的融合。多能融合使得不同能源之间的价值链融合,通过价值链互补的方式将创造更高的价值,而开启新业态。供需融合使得分布式电源与能源需求融合,形成了有源负荷,创新了能源供需平衡由全局转变为与局部相结合的微电网新业态。基于共享经济的源网荷储互动本质上是能源生产、传输、配送、存储和消费价值链的贯通,得益于数字经济,开启了更长产业链资源优化配置的新业态。

2.1 能源互联网开创了市场高效交易的新业态

当能源互联网将不同种类能源的供给、需求与配送以交错纵横的电网和互联网聚集在一个平台上,便赋予了能源互联网高效资源优化配置的能力。能源互联网企业将以市场方式配置资源,建立起以电力市场为主的能源市场体系。以新能源为主体的新型电力系统决定了电力市场在整个能源市场中的主导地位。

能源互联网如何更加高效地实现资源配置?其一是以数字技术消除市场竞争中的信息不对称。传统的市场均衡理论只是供需之间的量价均衡,没有将能源主体的复杂约束条件映射到报价曲线上,使得能源系统中各要素不能够以充分协同的方式实现帕累托最优。而物联网与边缘计算技术能够实现各要素自趋优模型的外部化,实现了局部与全局的精准协同,进而实现全局的帕累托最优。其二是能源互联网能够全面提升能源经济系统的弹性。经济学理论表明:具备充分弹性的经济系统才能拥有提升资源优化配置的空间。多能互补的本质是不同能源之间的互相替代,产生了不同能源之间的价格竞争,使得供给与需求比独立系统更具弹性,必然提升了资源优化配置的效率。不仅如此,不同能源之间运行特性的互补,例如

动态响应时间常数的差异,便产生了不同能源之间运行的协同效应。例如,电与热系统之间协同,热系统的慢动态可以为电系统提供廉价的紧急备用和储能潜力。其三是能源互联网开启了能源商业生态圈。市场主体通过共建平台,以平台撬动所有参与者的能力,最大限度地创造系统的整体效益;之所以能够撬动,是因为在这个生态圈中,存在着谁创造的价值谁分享、谁造成的成本谁分摊的激励机制,实现了物尽所能、人尽其责。不但促进了能源系统各要素的之间精准协同,而且产生了优胜劣汰的进化。

2.2 能源互联网开创了价值公平分配的新业态

能源互联网之所以能够吸引各市场主体的不断加入并共享信息,是因为各主体能够公平获取资源配置与信息共享所产生的价值。制度经济学认为:“除非得到好处,否则参与者一般不会真实地显示有关个人经济特征方面的信息”,这里的好处就是利益的公平分配。

共享信息是实现公平利益分配的前提,是能源互联网的基本制度。利益分配包含两层意思:其一是谁创造的价值,谁分享;其二是谁造成的成本,谁承担。这就需要在能源互联网上构建价值分配的模型,精准地辨识各经济主体对社会福利的贡献率。按照获得诺贝尔经济奖的维克里-克拉克-格罗夫斯机制(Vickrey-Clarke-Groves Mechanism, VCG),市场的结算规则应按照一个市场成员对其他市场成员的替代效益予以结算,这是度量每一个市场成员价值的方法。同样,需要在能源互联网上构建成本分摊的模型,追踪用户在不同地点和时间系统为之付出的代价,并据此形成用户的付费价格。如果不能实现这种精准的分摊,各市场主体之间就会出现成本“搭车”的问题,导致资源的错配。

2.3 能源互联网开创支撑智慧城市的新业态

智慧城市是利用各种信息技术将城市的系统和服务集成贯通,进而提升资源运用的效率、优化城市管理和服

务,从而降低了获取其他信息的成本,产生了通道的共享效益。这样的案例已屡见不鲜:能源互联网在感知电力传输的各环节时,也传输了粮仓的温度与湿度信息,对粮食的保鲜发挥了主要的作用,还可以传输仓库、车间的烟气信息,发挥了消防的作用;电网不但可以为每一个路灯上的监控设备供电,而且通过光纤电缆可直接传输图像,支撑城市的智慧交通和预防犯罪;千家万户智能电表的数据采集,也可为水表、天然气表、供热表提供抄表功能,改进抄表员入户或用户人工申报的传统方式;远离城市的输电线路的监控设备,同时也可服务于森林防火。

2.4 能源互联网开创支撑绿电追踪的新业态

能源大数据内隐藏着新能源生产、传输与消费的轨迹。如图2所示,电表精准记录了新能源发电,绿电市场记录了新能源生产与消费之间的交易,绿证市场记录了绿证在不同企业之间的转移,据此则能够追踪企业产品的绿证拥有量,实现了能源大数据支撑新能源全过程的追踪,能够精准地描述各中间或终端产品消费新能源的比例,从而获得反映产品竞争力的绿色指标。以新能源为主体的新型电力系统必须开展绿电追踪,这是能源互联网企业必须承担的社会责任。未来绿电追踪比碳市场更加有效,这是因为前者依据的是精准计量的客观数据,而后者需要碳排放监测,成本高,且存在人为干预的风险。前者是从需求侧推进碳减排、绿电化,用户的绿色需求将以市场的方式传导到生产与运输的各环节,降低政府碳治理的成本;而后者依赖政府对生产运输的各环节分配碳配额,由于信息不对称可能造成碳减排的效率下降与成本上升,提升了政府治理成本。为此,能源互联网企业的营销部门不再是简单地计费计量、业扩报装,而是要依据新能源企业绿电上网与用户绿电交易证书开展绿电追踪。当出口产品标记上绿电成分,将极大提升中国产品在国际上的竞争力。

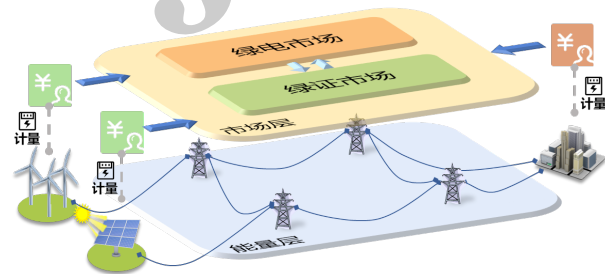


图2 能源互联网支撑绿电追踪

Fig. 2 The energy Internet supports the tracking of clean electricity

2.5 能源互联网开创节能降耗和提质增效的新业态

能源大数据能够提升能源消费的效率。当反映能源消费的样本数据共享后,电网不但可以通过数据聚类分析、因果分析,开展向落后企业提供反映差距性的数据增值服务;而且可开展用户参与源网荷储互动的潜力和价值分析,激活各用户参与电网运行的灵活性和需求弹性。当能源互联网企业通过物联网获得了用户生产过程的用电信息后,应建立用户用能行为的研究中心,开展诊断服务,可以通过比对同类用户的用能效率,给出提升能效的关键环节。根据市场不同交易品种的价格、用户用能的时序约束条件,分析用户提供灵活性的潜力、成本与获益,形成为用户创造价值的新业务。根据用户用能与用能效用的信息,诊断设备的能耗与效率,例如:根据房屋的供冷或供热面积、室内温度,诊断设备的效率或建筑的保温性能,为用户提供节能降耗的建议。

能源大数据能够分析企业所有设备的利用率。企业所有的设备运行都是能源的消耗过程,能源消耗的数据必然反映企业不同设备的利用率。其一是能够帮助企业家了解生产的进度,而不是通过报表,防止信息不对称产生的管理成本;其二是能够帮助企业家获得各设备的实时利用率,以发现制约产能的瓶颈;其三是能够帮助企业家了解设备的投资效果,避免“大马拉小车”的投资行为。让能量流的信息支撑企业管理是一种全新的增值服务。

2.6 能源互联网开创助力政府治理的新业态

能源大数据能够助力政府治理。能源大数据反映了整个城市能量流,表征了能源生产、传输与消费。能源消费的地理位置反映了社会活动的空间特征,能源消费的密度反映了工业生产的布局 and 居民区的分布视图,支撑未来城市发展合理布局的决策;商业负荷暴增的地区警示重大社会活动,提示城市应急资源的高度关注;某些地区用能密度的降低,警示生产活动的趋缓、财政收入的降低;电力负荷密度低的住宅地区,住房空置率高;新冠疫情后的复工复产真实情况主要依赖电网的用电数据,这比由下而上的传统填报方式具有高效率、低成本和信息真实性的优势。能源消费的时变特性反映了社会与生产活动的时序性。各企业的用能数据彼此之间的时序关联性表明了城市产业链的耦合程度;企业用电时间反映了企业加班的情况,一方面说明经济活动的提速,另一方面,为调度

城市交通资源提供信息支撑。当能源大数据与宏观经济数据相结合,能够提升政府把握经济活动的效果。各企业逐月用电量与宏观经济指数(如PPI)相结合,能够全面揭示微观经济活动的实际情况;分行业的逐月用电量的变化,反映了宏观经济调控的效果。上述能源大数据的挖掘必然助力政府治理水平的提升,本质上是消除了政府治理经济发展中的信息不对称。

3 推进能源互联网建设的战略

实现能源互联网的价值与业态创新迫切需要科学地制定发展战略。能源互联网的主要定位应该是再电气化、能源数据共享化、城市低碳化、电网智能化、用电智慧化、交易市场化。

3.1 再电气化是能源互联网建设的驱动力

再电气化是新能源应尽可能替代化石能源的战略需求。以新能源为主的电能将逐渐替代化石能源供热、供冷,电代油,电代气,逐渐改变终端能源的消费结构,形成以电为主的供能结构。当电与热耦合后,热系统低成本的储能优势将成为消纳新能源的灵活性资源,必然要求电网今后不仅调度电,而且要调度由电能驱动的供热与供冷系统。国际能源署数据显示,2018年供热占全球终端能耗的50%,占全球二氧化碳排放量的40%。热力消费中,工业部门占比约50%,建筑物房屋(主要用于空间采暖和热水供应,少量用于烹饪)占比约46%,其余为农业部门占比。而在很多大城市,空调负荷几乎占电力负荷的50%以上。利用建筑物的保温特性,可以为整个电网提供数量可观的储能空间,从而平滑新能源发电的波动性。储热还可以相对长时间、低成本地将新能源转化为热进行存储。新能源汽车也是再电气化的一个重要组成部分。能源消费的再电气化与以新能源为主体的电源结构相适应,形成了电、热、冷一体化运行的大系统,将成为能源互联网建设的核心驱动力。

3.2 以价值公平分配机制激励能源生产、传输、消费的全面数据共享

只有共享,才能释放数字技术的价值。但是如何激励市场主体的共享意愿,需要以价值公平分配为基础的激励机制。在众多市场主体中,实现信息共享存在一定的难度,市场主体总是希望通过信息不对称获取更多的利益。如何消除信息不对称、实现真实数据

的共享取决于市场制度能否确保价值分配总是激励说真话的市场主体。按照VCG理论,任何一个市场主体的价值取决于对其他市场成员的替代效益。因此,对能源互联网中市场成员的价值精准度量应该是:放弃这一市场成员交易导致整体社会福利的降低。在这一机制下,所有市场成员将物尽其用地申报自身供给、需求、价格,为数据共享提供了机制保障。只有真实、完整的数据共享,才能实现全产业链的帕累托最优,创新能源互联网企业的新业态。

3.3 构建基于数字孪生的人工智能平台

人工智能本质是让计算机学会人的思维与推理方式。大数据的价值在于让数据说话,通过数据认知社会和自然的规律,这都依赖于人工智能。尽管人工智能在电力系统中已得到了广泛应用,但都是初步的,现阶段人工智能还停留在负荷预测、电价预测、配网潮流计算、故障诊断、暂稳分析等领域的应用,基本上是对电力系统计算决策方法的改进。这是由现阶段数据基础决定的,当前的数据积累不够。人工智能真正产生重大价值取决于是否建立了电网的数字孪生系统。数字孪生是动态的,在数字对象与物理对象之间必须能够实现上下行的数据交互。数字孪生将解决传统机理模型无法解决的非线性、不确定性问题,与机器学习、深度学习构成一个不断进化的系统。建立数字孪生系统,通过人工智能不断地分析数据之间的规律,警示存在的风险,优化系统运行。人工智能不仅能够克服人类因情绪、岗位调整等因素产生的状态波动,而且能够依据数据思维,认知客观规律。这必然实质性地提升能源互联网的效率,其本质是极大地降低能源系统边界条件不确定性所付出的代价,提升能源系统运行的有序性所产生的协同效益,提高能源系统的安全性所带来的安全效益。人工智能可预测电网未来运行场景,可把握用户用能的规律,可汇聚最优秀人员的运行电网智慧,可记忆历史上所有历史场景、历史上开展过的各种计算分析,这些都是人工智能可大幅度提升能源互联网效益的关键所在。

3.4 以数字技术推进能源互联网智慧化

数字技术将构建电网各要素的数据驱动模型与开展人工智能决策,将表现出全时空的自组织、自趋优、自适应的智慧化。主要体现在以下的应用场景。能源互联网能够预见性地感知能源的供给与需求,根据全社会的大数据,预判能源供给与需求的价、量,

以及需求侧响应能力;能够通过数字孪生平台认知物理世界,预判未来电网可能出现的运行场景、风险,决策科学的应对策略;能够通过历史的决策计算与经验,加速当前计算决策过程;能够通过大量的离线计算,提升在线决策的效率;能够通过大用户生产过程用能数据的聚类分析,发现生产过程各环节用能协同性方面存在的问题,帮助用户提高用能效率;能够通过分析用户用电各环节产生需求侧响应的潜力,挖掘需求侧可提供的灵活性;能够通过用户用能数据的同时与延时相关性,揭示电网各母线负荷之间的关联性,提升母线负荷的预测精度;能够通过记忆最优秀人员调度运行电网的场景案例,全面提升劳动效率;能够通过历史场景记忆,开展基于历史场景的推演与现时计算决策,以模拟人的思维方式开展科学决策。实现智慧化是以各要素的精准协同应对能源互联网运行高度随机性的必要条件。

3.5 用电侧被动需求响应走向负荷精准调度

传统的电网主要调度发电,而能源互联网迫切需要开展负荷调度,实现源网荷储各环节的主动互动,不再是被动式的负荷需求响应。负荷能够被调度,而且要延伸到监控温度,通过温度的监控开展电力调度,是能源互联网调度方式的重大转变。需要采集用户各环节的用电信号、用电效用信息,在此基础上,构建用户调度模型,如化工厂、钢厂、造纸厂、宾馆等的调度模型。负荷模型的构建涉及整个工业流程,其复杂性、多样性远超过传统的电厂。负荷的互动不仅仅局限于日内的用电移峰填谷,而且可通过生产计划改变用电周期,实现用户参与能源供需的长期平衡,这对于以新能源为主体的新型电力系统尤为重要。这并不违背售电侧独立的电力体制改革,本文强调的是,负荷调度也可以由售电公司承担,现在有些售电公司已开始由赚取购售价差的模式转向最佳用能的调度模式。新型电力系统需要不同时间尺度的源网荷储互动,因而,负荷调度将支撑年、月、周、日、小时级的全周期互动。

3.6 构建基于数据技术与共享经济的市场机制

市场机制是通过竞争产生价值分配,从而激活各市场主体的积极性。市场效率取决于交易产生的社会福利与交易成本,一般的交易成本主要包括传播信息、广告、与市场有关的运输以及谈判、协商、签约、合约执行的监督等活动所花费的信息成本,交易

成本主要来源于信息不对称。数据技术能够消除信息不对称,为实现能源生态圈信息的完全共享提供了手段。然而,技术只是手段,还需要机制的创新,以激发各要素物尽其用、精准协同地开展能源生产、传输、消费以及相关的数据共享,共享的动力来源于机制能够对参与者价值精准度量与公平分配。只有基于价值公平分配的共享经济机制,才能激励市场成员提供真实的信息,消除参与者由于担心价值分配不公平而采取的非理性博弈行为。没有价值公平分配的市场机制,数据技术能够产生的价值将大打折扣,这是因为如果价值分配不公平,没有市场成员愿意公开自己的真实信息,数据技术的价值当然难以实现。

4 结论

为推动能源互联网的发展建设和价值实现,本文首先剖析了能源互联网的价值创造机理,其本质是以多能融合实现各能源系统的互联互通、突破孤立系统的边界,从而显著提升系统资源优化配置水平;通过信息技术使得能源系统更加有序、协同、智慧,进而促进能源系统的“熵减”;通过能源互联网平台,释放范围经济的巨大红利。其次,本文提出了消除信息不对称、激发各要素弹性、满足生态圈原理、更加高效的市场交易模式;设计了基于共享经济机制、降低交易成本、激励共享共赢的能源互联网价值分配机制;谋划了能源互联网支撑智慧城市发展、支撑绿电追踪、支撑能源消费节能降耗、提升工业资产利用率、助力政府治理的新业态。最后,本文策划了以再电气化为核心目标的能源互联网发展战略,通过以价值公平分配的数据共享、以数字孪生为平台的人工智能、用户侧精准调度、基于共享经济的市场机制全面推动能源互联网建设。本文的工作是在现有成果基础上对能源互联网技术与机制融合创新的进一步构想与机理探究,期待百花齐放、百家争鸣的学术探讨!

参考文献

- [1] 查亚兵,张涛,谭树人,等.关于能源互联网的认识与思考[J].国防科技,2012,33(5):1-6.
ZHA Yabing, ZHANG Tao, TAN Shuren, et al. Understanding and thinking of the energy Internet[J]. National Defense Science & Technology, 2012, 33(5): 1-6(in Chinese).
- [2] 曹军威,杨明博,张德华,等.能源互联网——信息与能源的基础设施一体化[J].南方电网技术,2014,8(4):1-10.
CAO Junwei, YANG Mingbo, ZHANG Dehua, et al. Energy Internet: an infrastructure for cyber-energy integration[J]. Southern Power System Technology, 2014, 8(4): 1-10(in Chinese).
- [3] 刘振亚.全球能源互联网[M].北京:中国电力出版社,2015.
- [4] 董朝阳,赵俊华,文福拴,等.从智能电网到能源互联网:基本概念与研究框架[J].电力系统自动化,2014,38(15):1-11.
DONG Zhaoyang, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. From smart grid to energy Internet: basic concept and research framework[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 1-11(in Chinese).
- [5] 马钊,周孝信,尚宇炜,等.能源互联网概念、关键技术及发展模式探索[J].电网技术,2015,39(11):3014-3022.
MA Zhao, ZHOU Xiaoxin, SHANG Yuwei, et al. Exploring the concept, key technologies and development model of energy Internet[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3014-3022(in Chinese).
- [6] 曾鸣,杨雍琦,刘敦楠,等.能源互联网“源-网-荷-储”协调优化运营模式及关键技术[J].电网技术,2016,40(1):114-124.
ZENG Ming, YANG Yongqi, LIU Dunnan, et al. “Generation-grid-load-storage” coordinative optimal operation mode of energy Internet and key technologies[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 114-124(in Chinese).
- [7] 孙宏斌,郭庆来,潘昭光.能源互联网:理念、架构与前沿展望[J].电力系统自动化,2015,39(19):1-8.
SUN Hongbin, GUO Qinglai, PAN Zhaoguang. Energy Internet: concept, architecture and frontier outlook[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 1-8(in Chinese).
- [8] 周孝信,曾嵘,高峰,等.能源互联网的发展现状与展望[J].中国科学:信息科学,2017,47(2):149-170.
ZHOU Xiaoxin, ZENG Rong, GAO Feng, et al. Development status and prospects of the energy Internet[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2017, 47(2): 149-170(in Chinese).
- [9] 国家发展改革委,国家能源局,工业和信息化部.关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见[EB/OL].(2016-02-29)[2021-12-13].http://www.nea.gov.cn/2016-02/29/c_135141026.htm.
- [10] 杰里米·里夫金著,张体伟,孙豫宁译.第三次工业革命:新经济模式如何改变世界[M].北京:中信出版社,2012.
- [11] 埃森哲.中国能源互联网商业生态展望[J].软件和集成电路,2017(12):70-78.
- [12] 杨方,白翠粉,张义斌.能源互联网的价值与实现架构研究[J].中国电机工程学报,2015,35(14):3495-3502.
YANG Fang, BAI Cuifen, ZHANG Yibin. Research on the value and implementation framework of energy Internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3495-3502(in Chinese).

- [13] 钟迪, 李启明, 周贤, 等. 多能互补能源综合利用关键技术研究现状及发展趋势[J]. 热力发电, 2018, 47(2): 1-5.
ZHONG Di, LI Qiming, ZHOU Xian, et al. Research status and development trends for key technologies of multi-energy complementary comprehensive utilization system[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(2): 1-5(in Chinese).
- [14] 艾芊, 郝然. 多能互补、集成优化能源系统关键技术及挑战[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 2-10.
AI Qian, HAO Ran. Key technologies and challenges for multi-energy complementarity and optimization of integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 2-10(in Chinese).
- [15] 刘世成, 张东霞, 朱朝阳, 等. 能源互联网中大数据技术思考[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(8): 14-21.
LIU Shicheng, ZHANG Dongxia, ZHU Chaoyang, et al. A view on big data in energy Internet[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(8): 14-21(in Chinese).
- [16] 李存斌, 李小鹏, 田世明, 等. 能源互联网电力信息深度融合风险传递: 挑战与展望[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(11): 17-25.
LI Cunbin, LI Xiaopeng, TIAN Shiming, et al. Challenges and prospects of risk transmission in deep fusion of electric power and information for energy Internet[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 17-25(in Chinese).
- [17] 孙鸿飞, 彭丽, 倪嘉蓓. 智能电网大数据——能源互联网环境下的能力提升与价值创造[J]. 中小企业管理与科技(中旬刊), 2017(8): 167-169.
SUN Hongfei, PENG Li, NI Jiaran. Smart grid big data—ability promotion and value creation in the energy Internet environment[J]. Management & Technology of SME, 2017(8): 167-169(in Chinese).
- [18] 杨锦春, 刘慧. 能源互联网的资源配置效应研究[J]. 技术经济与管理研究, 2020(1): 109-113.
YANG Jinchun, LIU Hui. Research on resource allocation effect of energy Internet[J]. Journal of Technical Economics & Management, 2020(1): 109-113(in Chinese).
- [19] 曾鸣, 杨雍琦, 李源非, 等. 能源互联网背景下新能源电力系统运营模式及关键技术初探[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(3): 681-691.
ZENG Ming, YANG Yongqi, LI Yuanfei, et al. The preliminary research for key operation mode and technologies of electrical power system with renewable energy sources under energy Internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(3): 681-691(in Chinese).
- [20] 张东霞, 苗新, 刘丽平, 等. 智能电网大数据技术发展研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(1): 2-12.
ZHANG Dongxia, MIAO Xin, LIU Liping, et al. Research on development strategy for smart grid big data[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(1): 2-12(in Chinese).
- [21] 刘世成, 韩笑, 王继业, 等. “互联网+”行动对电力工业的影响研究[J]. 电力信息与通信技术, 2016, 14(4): 27-34.
LIU Shicheng, HAN Xiao, WANG Jiye, et al. Research on the influence of “Internet+” initiative on power industry[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2016, 14(4): 27-34(in Chinese).
- [22] 白翠粉, 韩新阳, 杨方, 等. 基于价值分析的能源互联网功能架构研究[J]. 中国电力, 2018, 51(8): 31-37.
BAI Cuifen, HAN Xinyang, YANG Fang, et al. Research on the functional architecture of the energy Internet[J]. Electric Power, 2018, 51(8): 31-37(in Chinese).
- [23] 国家发展改革委, 国家能源局. 关于推进多能互补集成优化示范工程建设的实施意见[EB/OL]. (2016-07-07) [2021-12-13]. http://www.nea.gov.cn/2016-07/07/c_135496039.htm.
- [24] 陈彦博. 广州能源互联网新业态培育研究[J]. 纳税, 2017(33): 107-108.
- [25] 曾鸣. 能源互联网的发展路径[J]. 中国电力企业管理, 2016(25): 48-53.
- [26] 刘敦楠, 曾鸣, 黄仁乐, 等. 能源互联网的商业模式与市场机制(二)[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3057-3063.
LIU Dunnan, ZENG Ming, HUANG Renle, et al. Business models and market mechanisms of energy Internet (2)[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3057-3063(in Chinese).
- [27] 王迪忻, 张一泓, 杨轩, 等. 电网企业新业态商业模式与评价体系初探[J]. 中国市场, 2021(23): 164-165.
- [28] 徐拥军. 碳中和战略下的能源互联网发展[J]. 张江科技评论, 2021(4): 28-29.
- [29] 安建伟. 什么是智慧能源产业创新与能源互联网? [J]. 互联网周刊, 2015(7): 64-65.
- [30] 晔振宇, 赵东元, 高峰. 能源互联网引领清洁取暖技术变革[J]. 中国电力, 2018, 51(8): 117-121.
ZI Zhenning, ZHAO Dongyuan, GAO Feng. Energy Internet leads technological changes of clean heating[J]. Electric Power, 2018, 51(8): 117-121(in Chinese).
- [31] 郑斌, 张云雷, 曹瑞峰. 基于价值网理论的用户侧储能商业模式及参与策略分析[J]. 产业与科技论坛, 2020, 19(12): 86-87.
- [32] 陈启鑫, 刘敦楠, 林今, 等. 能源互联网的商业模式与市场机制(一)[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3050-3056.
CHEN Qixin, LIU Dunnan, LIN Jin, et al. Business models and market mechanisms of energy Internet(1)[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3050-3056(in Chinese).
- [33] 王永真. 能源互联网下综合能源服务的新特征、新挑战[J]. 能源, 2020(6): 64-66.
- [34] 王永真, 张靖, 赵伟. 能源互联网的“热响应”与“冷思考”[J]. 能源, 2019(9): 61-65.
- [35] 甘中学, 朱晓军, 王成, 等. 泛能网: 信息与能量耦合的能源互联网[J]. 中国工程科学, 2015, 17(9): 98-104.
GAN Zhongxue, ZHU Xiaojun, WANG Cheng, et al. Ubiquitous energy Internet—new energy Internet coupling with information and energy[J]. Engineering Sciences, 2015, 17(9): 98-104(in Chinese).
- [36] 邓茂云, 屈博, 邢广进. 能源互联网背景下用户能源服务

- 的商业模式探索[J]. 电力需求侧管理, 2019, 21(3): 59-62.
DENG Maoyun, QU Bo, XING Guangjin. Business model exploration of customer energy service under the background of energy Internet[J]. Power Demand Side Management, 2019, 21(3): 59-62(in Chinese).
- [37] 陈琛, 郭莉, 谈健, 等. 能源互联网背景下能源电商发展策略研究[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(5): 502-508.
CHEN Chen, GUO Li, TAN Jian, et al. Development strategy for energy E-commerce in the energy Internet environment[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(5): 502-508(in Chinese).
- [38] 王小辉, 陈岸青, 李金湖, 等. 基于能源大数据中心的数据商业运营模式研究[J]. 供用电, 2021, 38(4): 37-42.
WANG Xiaohui, CHEN Anqing, LI Jinhu, et al. Research on data business operation mode based on energy big data center[J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(4): 37-42(in Chinese).
- [39] 刘建平, 杨健, 刘涛, 等. 中国能源革命的目标与路径: 从能源互联网到智慧能源(中)[J]. 能源, 2017(8): 84-87.
- [40] 胡海涛, 郑政, 何正友, 等. 交通能源互联网体系架构及关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(1): 12-24.
HU Haitao, ZHENG Zheng, HE Zhengyou, et al. The framework and key technologies of traffic energy Internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(1): 12-24(in Chinese).
- [41] 王晓辉, 刘鹏, 季知祥, 等. 能源互联网共享运营平台关键技术及应用[J]. 电力信息与通信技术, 2020, 18(1): 46-53.
WANG Xiaohui, LIU Peng, JI Zhixiang, et al. Key technology and application of sharing operation platform for energy Internet[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2020, 18(1): 46-53(in Chinese).

收稿日期: 2022-01-03; 修回日期: 2022-01-24。



唐跃中

作者简介:

唐跃中(1970), 男, 正高级工程师, 研究方向为电力企业信息化、数字化电网、企业管理等, E-mail: tangyz@sh.sgcc.com.cn。

夏清(1957), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为能源经济、能源互联网、电力系统优化运行、电力市场等。通信作者, E-mail: qingxia@tsinghua.edu.cn。

张鹏飞(1985), 男, 高级工程师, 研究方向为战略管理、决策支持、信息情报等, E-mail: zhp85@163.com。

(责任编辑 李锡)