

# 面向用户需求的区域能源互联网价值形态研究框架及应用分析

郭健<sup>1,2</sup>, 曹军威<sup>1</sup>, 杨洋<sup>3</sup>, 陆超<sup>2</sup>, 张东霞<sup>4</sup>, 刘敦楠<sup>5</sup>, 华昊辰<sup>1</sup>

1. 北京信息科学与技术国家研究中心, 北京市 海淀区 100084;
2. 清华大学 电机工程与应用电子技术系, 北京市 海淀区 100084;
3. 国网河北省电力有限公司经济技术研究院, 石家庄市 裕华区 050000;
4. 中国电力科学研究院有限公司, 北京市 海淀区 100192;
5. 华北电力大学 经济与管理学院, 北京市 昌平区 102206)

## User Demand Oriented Research Framework of Value Morphology for Regional Energy Internet and Its Application Analysis

GUO Jian<sup>1,2</sup>, CAO Junwei<sup>1</sup>, LU Chao<sup>2</sup>, ZHANG Dongxia<sup>3</sup>, LIU Dunnan<sup>4</sup>, HUA Haochen<sup>1</sup>

1. Beijing National Research Center for Information Science and Technology, Haidian District, Beijing 100084, China;
2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China;
3. State Grid Hebei Economic Research Institute, Yuhua District, Shijiazhuang, 050000, China;
4. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China;
5. School of Economics and Management, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China)

**ABSTRACT:** User energy demand oriented principle was used to build bottom-up regional integrated energy system in this paper. There are five kinds of energy use behaviors analyzed, including using inclusive, cost sensitive, quality sensitive, incentive response and policy guaranteed. According to the value supply chain theory, research framework on regional energy internet value form was constructed from three aspects of value factors analysis, value carrier design and value realization mechanism. Moreover, the scientific and theoretical issues and key technologies involved in the field of regional energy internet value morphology were summarized. Finally, it draws on the way of systemic thinking methodology to construct a three-stage evaluation system of "stage-attribute-value". The regional energy internet value scenario was discussed at different stages of development, such as ubiquitous connection and interactive integration, intelligent service, which provides theoretical guidance for energy cloud infrastructure construction and connectivity.

**KEY WORDS:** user demand; regional energy internet (REI); value morphology; energy cloud

**摘要:** 以用户能源需求类型为导向, 自底向上构建区域能源需求结构。按照普惠用能、成本敏感性、质量敏感性、激励

响应性和政策保障驱动性对用户用能行为进行了分类分析; 根据供应价值链理论, 从价值要素分析、价值载体设计、价值实现机制三方面构建了区域能源互联网价值形态研究框架, 分析提炼涉及区域能源互联网价值形态研究的科学理论问题及关键技术; 最后借鉴系统性思维方法论, 建立“阶段-属性-价值”三维评价体系, 在泛在连接、互动融合、智能化服务等不同发展阶段讨论了区域能源互联网价值应用场景, 为能源云基础设施建设与连通提供理论指导。

**关键词:** 用户需求; 区域能源互联网; 价值形态; 能源云

**DOI:** 10.13335/j.1000-3673.pst.2016.3045

## 0 引言

区域能源互联网概念的提出, 得益于分布式新能源、储能的广泛接入以及电力电子、先进信息与互联网技术的不断进步<sup>[1-4]</sup>。在经历了智能电网、微电网、综合能源系统等不同发展阶段后<sup>[5-9]</sup>, 目前对能源互联网的认识从4个方面展开: 一是针对能源互联网建设内容, 从总体技术架构上展开论述, 包括技术特征、技术要素、技术形态、发展模式等<sup>[10-12]</sup>; 二是针对多能互补集成的业务形态与运营模式, 要统筹考虑源-网-荷-储的协调运行与优化控制, 提

出更适应分布式能源管理的调度安排与控制策略<sup>[13-19]</sup>；三是针对能源与信息基础设施的融合，借鉴计算机网络分层的设计思路，构建适应不同发展阶段的能源互联局域网、广域网体系<sup>[20-22]</sup>；四是针对能源互联网具体运行场景和现有技术条件，在配电网侧开展了电能路由与变换器、新型同步相量测量等关键装置的研发工作<sup>[23-24]</sup>；五是根据不同研究层次的能源互联网运行目标构建分层控制体系，通过智能协调优化实现可再生能源的高渗透率与能源需求侧的高效互动机制<sup>[25-26]</sup>。

区域能源互联网是以电为核心的能源供需结构形态，它和电力市场是相辅相成的。随着电力体制改革的持续推进<sup>[27]</sup>，通过电价反映能源供需波动和传输阻塞情况，同时根据电价信息共享机制，实现源-网-荷-储的及时响应，这也都是能源互联网开展相关业务的应有之义<sup>[28]</sup>。文献<sup>[29]</sup>总结了国外欧美发电国家电力市场放开管制后的进一步发展侧重于分布式绿色能源接入和需求侧响应的市场化运作与监管；文献<sup>[30]</sup>针对边际价格机制可能带来的信息不对称问题，提出了基于 Vickrey-Clarke-Groves 的日前市场报价机制，以期发现真实成本，更好实现市场主体间的激励相容；文献<sup>[31-33]</sup>则是以电价波动信息作为自变量，研究微观市场主体参与下的充放电优化策略，实现储能收益最大化或用能成本最小化；文献<sup>[34]</sup>进一步提出了能源互联网信息经济学的研究框架。

目前新能源、输配电、自动控制、信息通信等专业技术领域的研究积累，基本能满足现阶段能源互联网的发展要求，但在把各类技术统集成时，却面临着理念认识上的几个问题：

1) 开放、对等、互联、共享是体现互联网思维的重要特征。它们是互联网思维的外延，而连接、融合、服务则是互联网思维的价值内涵，也是呈现开放性、平台型、共享型特征的互联网行业形态不断发展进化的源动力。专业化程度较高的油、气、电力等能源行业在新发展形势下，逐渐暴露出垂直封闭、保守僵化、发展后劲不足的弊端。因此，有必要对区域能源互联网价值形态展开相关的研究与讨论。

2) 同时，针对能源互联网概念体系、技术架构、发展路径等宏观层面的论述较多，自顶向下的计划设计思维明显。考虑结合微观用户主体用能需求，“自底向上”展开分析的较少。

3) 目前国内电力商品经济特征主要以买卖价差的形式体现。未来“互联网+”驱动融合下的能源互联网，末端用能侧会接入大量分散、分布式可再生能源和储能资源，能量双向流动将成为新常态。通过不断中国特色电力市场机制设计，在买卖价差基础上的电力市场经济将提供更多定制标准化、有质量差别和个性化、互动化的用电与用能服务，以满足各类市场主体用能等级需求，而针对以上用能服务的价值分配是新的研究课题。

本文认为，区域能源互联网是面向用户需求，借助技术手段以达到多能互补协调优化运行的目的，通过建立市场主体间的良性博弈机制，能够提供绿色、可靠、经济、高效等多元化用能服务的区域信息物理社会系统；同时，也是一种在服务用户用能过程中实现各方参与主体多赢的价值承载形态。本文以用户能源需求作为分析起点，对区域能源互联网的价值形态展开论述；构建区域能源互联网价值形态的研究层次与框架，分析涉及的关键理论与技术；讨论不同发展阶段下的价值应用场景。

## 1 用户能源需求分析

油、电、热、气、冷是现代社会里企业和家庭用户不可或缺的能源消费种类，它们满足了人类生产生活过程中的能源需求。能源供给侧和消费侧的再电气化进程，使得电能作为主要能源供应类型的地位不断加强。在能源互联网环境下，终端用户直接面对的是综合能源服务商，背后支撑它的是高电压等级输电网、长距离油气管道等骨干物理网络，加上全产业链条部署的高精度传感装置与高速通信网络集成支撑了能源数据分析及其上层应用；同时终端用户也不再是刚性的能源消费方，而是变成了“产销者”(Prosumer)角色<sup>[35]</sup>，拥有了更大的自主控制与交易权。自底向上构建面向用户的能源需求结构，如图 1 所示。

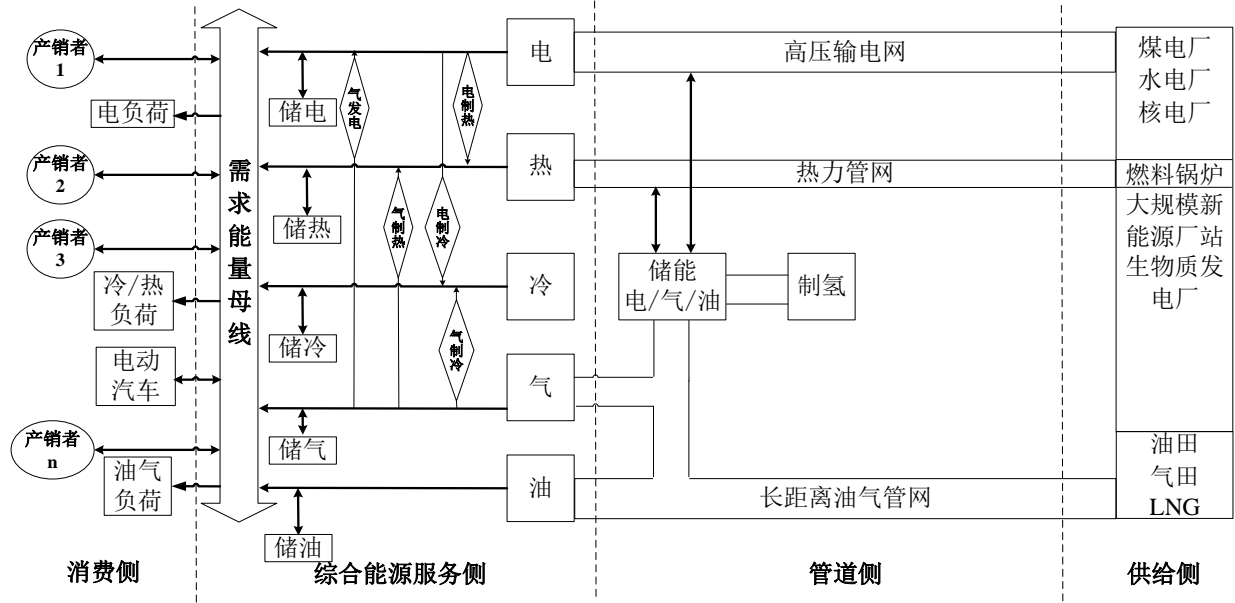


图1 面向用户的能源需求结构  
 Fig. 1 User Oriented Energy Demand Structure

从消费需求侧来看，综合能源服务是打通能源供给“最后一公里”的灰箱系统；它既能满足需求侧用户的能量需求，又能动态接收产销者用户生产外溢的能量。能源供给侧和管道侧是综合能源服务的上游，其中储能在需求侧、综合能源服务侧和管道侧的作用不同。管道侧储能侧重于运行安全性，综合能源服务侧储能更多关注经济可靠性，需求侧的储能侧重于生产动力性和经济性相结合。

按照产业结构特点，将终端用户用能类型划分为工业园区、商业中心、农业生产、公共服务、数据中心和居民生活等6类。其中，工业园区和商业中心的用能模式呈现明显地潮汐特点，居民生活用能则呈现反向潮汐特点；农业生产用户呈现季节性用能特征；政府机关、医院、学校等提供公共服务的机构用能，需要保证较高的稳定性；数据中心用户则对可靠性要求更高。

基于以上能源类型分析，将需求侧用户用能行为进行分类如下：

- 1) 普惠用能。普惠性是构建能源基础设施的基本功用，它为现代社会生产和生活的高效运转提供了动力来源，也是能源行业安身立命的基础。
- 2) 成本敏感性。考虑成本是市场经济环境下微观市场主体决策经济活动的重要依据。有色化工冶炼等高耗能行业和工业园区，其用能成本占据了其生产成本的大部分，对能效提升的需求强烈。
- 3) 质量敏感性。高质量产品与服务意味着高投入。精密仪器、芯片半导体等高精尖制造行业和数据中心对电能质量和可靠性的要求更高，需要采用

更先进的技术手段和措施保障高品质、高可靠性的电能供给。

(4) 激励响应性。用户根据波动的市场价格调节能源需求，是市场这只“看不见得手”的魔力。梯级电量电价政策培育了用户的节能意识。峰谷平电价、尖峰电价、实时电价等机制的设计实施，一方面能起到动态平抑负荷波动的作用，另一方面也为综合能源服务代理商预测分析用户用能行为，进而提出更及时合理的用能激励措施，提供了数据源。

5) 政策保障驱动性。能源革命与发展转型是未来要持续几十年的行业历史事件，这需要能源体制、机制的不断改革创新和政策、法律法规的保驾护航。分布式新能源在消费需求侧的广泛渗透，离不开强制性监管和经济性补贴政策的相得益彰。最终都要以法律法规的形式确定下来，才会保障行业持续健康良性发展。

## 2 区域能源互联网价值形态

依据马克思政治经济学原理，价值形态是基于价值实体产生的交换关系总和。具体到能源互联网价值形态，则是在物理实体、技术应用、机制运行等价值组成单元上开展能源生产、传输、消费等各类活动时所发生的能源转换、转化、变换、交易关系的统称。

基于价值链管理理论，结合能源结构调整和政策实施情况，以电力为核心分析能源互联网形态和传统电网形态的区别，如表1所示。

表1 基于价值链分析能源互联网与传统电网的区别

Tab. 1 Differences between energy internet and traditional power grid in the view of value chain

价值链	分析领域	能源互联网	传统垂直一体化电网
电能生产	技术领域	清洁替代, 清洁发电	先进发电
	市场类型	中长期、短期、现货、碳排放	统购统销
	业务领域	发电权交易, 直接售电, 碳交易, 配额	上网电量
电能传输	技术领域	大规模新能源消纳, 特高压交流, 直流运行控制, 经济调度	发电计划、大电网运行控制
	市场类型	跨区、省间、省内交易, 辅助服务, 输电权交易	统一规划下的管制市场
	业务领域	与电网调度安全、运行和电力市场两级交易体制相关及配套的业务	大电网统一调度
电能消费	技术领域	电能替代、微网、综合能源系统、多能互补、虚拟电厂等	先进配用电
	市场类型	分布式能源交易, 辅助服务、用电权交易、绿证市场等	集中管制市场
	业务领域	能效管理、售电代理、设备运维等服务	卖电营销

需要指出的是, 能源互联网不是简单地对传统电网的颠覆, 而是在传统电网基础上的升级换代。相对于垂直一体化、纵向集中管制的封闭思维, 它在横向连接上更加开放, 更关心市场化竞争理念在电力生产、传输和消费中的落实应用, 以期更细化的业务分工能带来更大的行业市场价值。但能源领域重资产、高投入的自然垄断行业属性, 使得在能源输送管道侧引入同质竞争的成本巨大, 市场效率却很难提升。

区域能源互联网主要是对能源消费需求侧的改造升级, 它将过去孤立规划建设电、热、气、冷输送通道打包集成整合, 基于先进的能量转换设备、存储装置和多能优化运行技术, 实现多能源品类的高效转换、转化和梯级利用。区域能源互联网是能源产销者和消费者的集合体, 其中既有包含风电、光伏、燃气冷热电联供等发电单元的微型电网、又有能开展需求侧响应与管理的智能生活社区; 它们通过高速通信网络和大数据、云计算、人工智能等新一代信息技术, 为稳定可靠、主动高效地参与能源调度与市场交易提供了技术手段, 如图 2 所示。

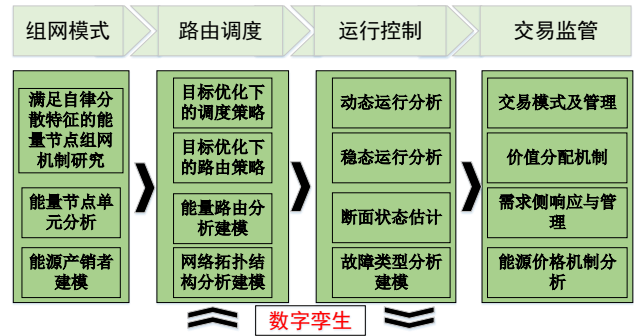


图 2 区域能源互联网价值形态

Fig. 2 Regional Energy Internet Value Morphology

### 1) 价值要素分析。

区域能源互联网的价值要素包括物理单元, 网络单元, 数据单元等 3 部分。其中, 物理要素单元是区域能源互联网的一次系统, 包括交直流输电线路、电力电子变压器、能量路由器、储能, 以及风电、光伏等本地发电装置, 它们共同构成了能源云的基础设施层; 网络要素单元是区域能源互联网的二次系统, 包括通信网络、电力电子控制器、传感器、计量器等能实现遥测、遥调、遥信功能的设备; 数据要素单元则是一二次系统运行产生的内部运行数据和外部环境数据, 它和网络要素单元共同构成了能源云的平台数据层。

### 2) 价值载体设计。

区域能源互联网的价值载体设计包括 4 部分内容: 组网模式、路由调度、运行控制、交易监管。组网模式包括能源产销者的建模、能量节点单元分析与能量节点组网机制等, 目的是增强区域能源互联网的灵活性; 路由调度包括网络拓扑结构建模、能量路由分析建模、目标优化下的能量调度与信息路由等, 目的是保障它的可行性与经济性; 运行控制包括断面状态估计、稳态分析和动态分析、故障类型分析诊断等, 目的是提高系统运行的安全性; 交易监管包括电价预测、交易模式管理、价值分配、需求侧响应与管理等, 目的是在开放的电力市场环境下获取更大的利益。它们共同构成了能源云的平台应用层。

### 3) 价值实现机制。

满足用户用能的客观需求是能源互联网价值实现的基本保障。从价值链管理角度分析, 它也是电能商品的销售和终端服务环节。借助能源云提供的平台数据和应用服务, 挖掘能源生产、传输和消

费中产生的数据信息，通过提高用能效率，降低用能成本，减少用能风险等方式来创造新的价值，也是判断区域能源互联网成功与否的重要依据。

### 3 关键理论与技术

借鉴互联网云计算理念，本文给出能源云的定义：能源云是传统能源基础设施结合先进网络通信与信息技术构建的能源信息一体化基础设施，通过对能源生产、流通和消费等产业链上下游的云端管理，能够为各类用户提供灵活智能的按需能源服务，最终实现提高能效的同时降低能源强度。能源云是信息物理系统融合发展在能源行业的集中体现。借鉴互联网分层体系的设计理念，分层原则同样依据文献[21]。以信息能量集成母线作为能源云基础设施的基本组成单元，分析面向能源产销者的区域能源互联网研究层次，如图3所示。

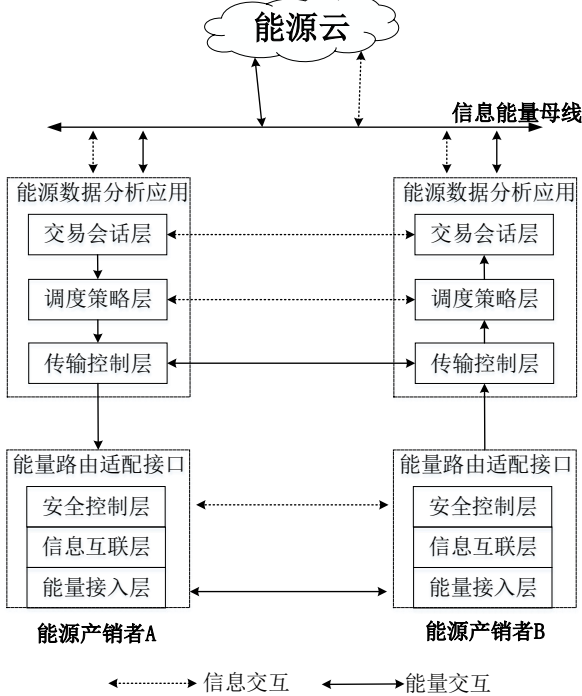


图3 面向能源产销者的区域能源互联网研究层次  
Fig. 3 Prosumer Oriented Regional Energy Internet Research Structure

能源产销者的层次化建模包括底层能量路由适配和上层能源数据分析应用2部分内容。能量路由适配可以看作能源互联单元连接的驱动程序，它包括网络层适配（energy router internet protocol, ERIP）和物理层适配（energy router media access control, ERMAC）2类能量信息驱动接口。其中，ERIP接口一方面解析上层应用对能量调度和设备信息操作的指令，同时执行上层下发的控制策略，保证自身的功率平衡和稳定运行，另一方面，将底层能量流动、网络信息和运行状态进行封装后供上层应用调用；ERMAC接口负责在能源局域网内执行能量和信息的物理传输过程。能源数据分析应用类似能源网络路由器操作系统(energy router operating system, EROS)的，实现面向能源业务的传

输控制(energy transmission control, ETC)、调度策略(energy dispatching strategy, EDS)、交易会话(energy exchange session, EXS)等信息化决策支撑功能。它的功能是解析用户操作、环境状态和交易会话信息为调度策略，然后由传输控制层负责向下层发送能量传输指令，并根据ETC信息传输三次握手协议来获取能量传输是否成功的标志。借鉴局域网MAC数据帧传输机制，设计能量信息路由协议封装机制，如图4所示。

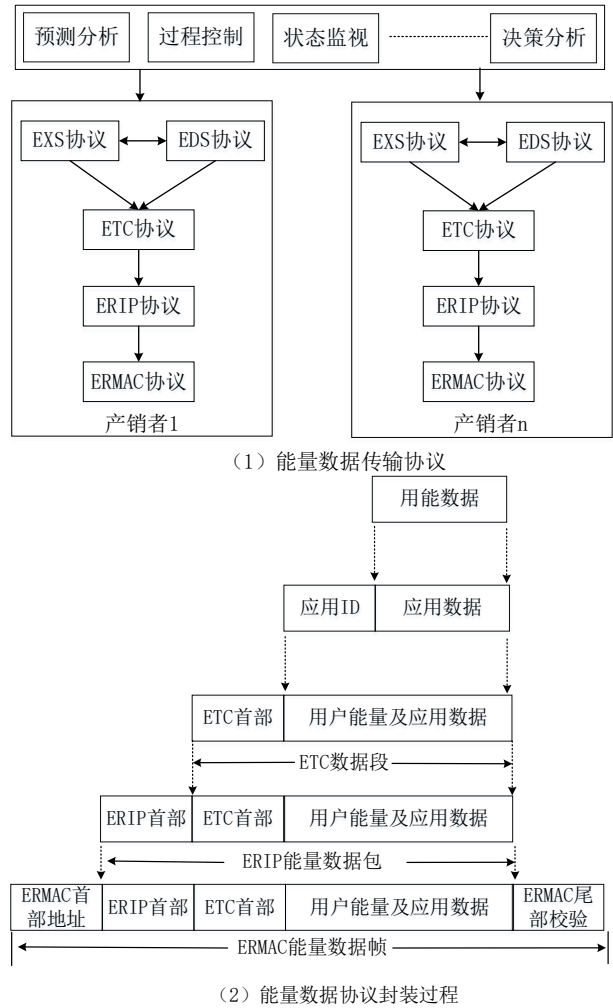


图4 能量信息传输协议封装  
Fig. 4 Energy and Data Transfer Protocol Encapsulation Structure

### 3.1 理论分析

本文分别从物理层、信息层和价值层角度论述区域能源互联网价值形态的研究框架，见图5所示。物理层描述区域内“源-网-荷-储”等要素单元的能量传输、存储与转换过程。信息层是对物理层能量流动、转换和转化过程的实时监测、数据传输、存储及应用，它包括传感网络、数据中台管理和调度运营3部分内容。价值层包括能源交易与能源服务，通过灵活的交易策略和先进信息技术支撑，提高能源生产/消费效率，降低用能成本。

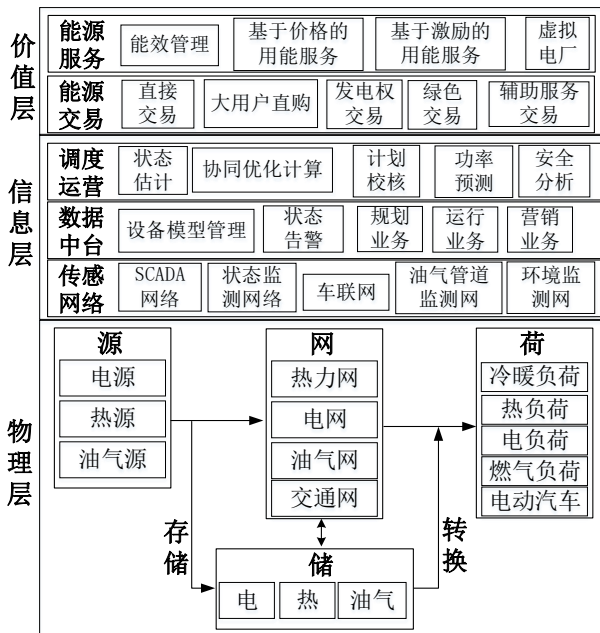


图5 区域能源互联网价值形态研究框架

Fig. 5 Regional Energy Internet Research Architecture

其中涉及的基础理论问题如下：

#### 1) 信息路由与能量调度的协同优化。

信息路由是离散量，网络连通性能够保证数据的可达性；而能量调度是连续量，且需要实时满足功率平衡。离散量采集与连续量传输的矛盾，信息可达性与供需实时性的矛盾，是信息路由与能量调度集成面临的两类主要矛盾。通过它们之间的协同优化，实现信息与能量系统的高效融合，是区域能源互联网要解决的基本运行理论问题。

其中电力流、交通流和天然气流体的优化调度问题，在数学上是一个考虑多时段、多阶段、多目标的随机优化模型求解过程。包含的约束条件除了网络安全和运行约束外，还需考虑各类设备的运行约束和耦合转换系数。如三联供机组、间歇性可再生能源、储能等存在爬坡限制、启动环节、功率限幅；储能还需考虑储/释能功率限制、荷电状态约束等；负荷用能的柔性调节如空调负荷需考虑室内温度约束、用户行为响应，以及电动汽车参与调峰调频的充放电策略分析等。

#### 2) 传感通信网络与能源供需的可靠性。

冗余和网络层次化设计理念保证了传感通信网络的可靠性。大电网三道防线的安全保护配置为保障能源供应安全发挥了举足轻重的作用。结合通信网络纵向标准贯通和能源传输网络横向安全隔离，保障信息交互和能源供需的安全运行，是区域能源互联网可靠性理论要解决的基本问题。其中，涉及信息完整性、精确性和实时性的评估，考虑环境和网络因素下不同通信规约和业务模式对信息延时、误码的要求，建立信息传输可靠性模型；综合分析信息通信系统与能量传输、转换、转化物理系统之间的耦合关系，建立多源统一可靠性分析模型和适应各种用能场景下的可靠性评估方法。

#### 3) 能源交易与价值分配。

公平的市场机制设计是开展能源交易的前提。垂直一体化的计划管制理念，短期能够带来能源交易效率的提升，长期却会降低社会总体福利水平，最终导致效率低下。目前，技术层面的电力市场化已是大势所趋，这势必带来产权经济的主张、确立与划分。能源产销者作为电力市场中的微观主体，由于所有权、运营权和收益权的分离而带来的价值分配问题，是区域能源电力市场的基本经济理论问题。

在开放售电市场环境下，存在能源供应方、运营方、代理方和用户等多方利益主体。能源供应方是外部能源市场，既是电能、油气等能源价格制定者，也能接收运营方合理报价下的多余能源上网。用户类型多样，既有稳定的电/热用户，也包括新型的电动汽车用户和具备需求响应能力的可控负荷单元。代理方负责优化用户用能策略，降低用能成本，通过提供用能服务获取收益。运营方一方面对区域内的间歇性可再生能源、多能流耦合设备和储能装置进行管控和优化调度，提高自身发电的就地消纳率；另一方面则负责与能源供应方和用户代理进行能源交易，获取差价利润。其中，能源供应方的报价策略、用户的用能策略、运营方和代理方的控制优化策略，它们之间存在信息的不对称。通过构建激励相容的博弈模型，参与日前计划市场或实时市场，能进一步提高系统协同优化能力和经济运行水平。

#### 4) 能源大数据知识图谱。

传感器、网络技术和计算能力的不断提升，特别是5G网络的大规模普及<sup>[34]</sup>，未来将是万物互联的数字能源社会。在能源产-供-销-储-用的供应链体系中，各环节会产生海量有价值的信息数据。基于这些数据挖掘面向政府监管、能源企业、社会公众等群体，能及时满足不同需求的知识图谱，则是区域能源互联网面临的数据科学问题，它分为数据层和模式层两部分。其中，数据层既包括系统运营针对规划、运行、营销业务的运行状态量数据、设备检修数据、市场交易数据，又包括代理用户方开展需求侧响应管理的时空用能数据等；模式层则是对数据层的各类数据信息特征进行抽取、计算、关联分析过程的知识描述，包括调度模式、交易模式、监管机制、用能模式、需求响应策略等。

### 3.2 关键技术

#### 1) 能量路由器。

能量路由器是区域能源互联网的核心装置，也是能源信息物理系统融合的有形载体<sup>[35]</sup>。在硬件层面，它涉及电力电子变压器、网络路由、继电保护、储能等设备的智能化集成与控制技术；在软件层面，它要能支撑上层自定义软件应用的控制策略和分散自律式的组网要求。在功能上，对内要保持系统各功能模块的安全稳定运行，对外要能及时满足用户用能需求，并能接受上级能源服务和监管机构的管理，结构设计如图6所示

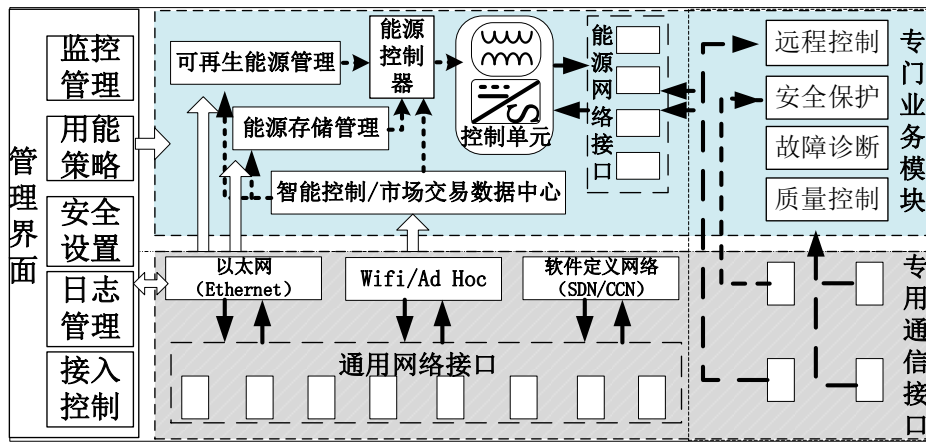


图6 能量路由器结构

Fig. 6 Energy Router Structure

其中，下层作为信息支撑层提供各种通信所必须的接口和相应的高效转发机制，包括网络协议接口、远程控制、安全保护及能量质量控制专用通信接口。上层是能量控制层，提供能源接入、质量调节、优化管理、故障诊断的专门化功能和丰富的标准接口；控制功能由综合数据中心和专门业务单元联合实现；控制指令由控制器统一调配控制单元实现，控制单元支持能源转换、转化等多种实现方式。

### 2) 能源区块链。

区块链是以 P2P 网络和数据加密技术为基础，构建去中心化的分布式共享数据库<sup>[38-39]</sup>。能源区块链是区块链在电能计量认证和交易中的应用表述。基于区块链的交易不可篡改与可追溯性，能降低能源交易过程的信任成本，维护公平的市场运行环境；去中心化的设计理念，能够降低能源交易的信任成本，提高能量流、信息流和资金流的运行效率；其智能合约机制适用于能源消费自动结算、需求侧主动响应、分散自主控制等多能源产销者自治运行场景。具体应用形式见表 2 所示。

表 2 能源区块链应用形式  
Tab. 2 Energy Block Chain Application Form

应用形式	应用领域	应用内容
技术应用	分布式存储	云存储, 可信存储
	分布式计算	能源调度云、运行分析云、仿
		真云、负荷云
	自律协同控制	调度优化、虚拟电厂、电动汽车充放电优化策略、多能互补
智能执行	状态监测、故障诊断、需求侧响应, 能量套餐	
商业应用	能源货币	电力代币, 积分通兑
	能源计量	能效管理、绿证、碳排放、新能源补贴
	能源交易	直接交易、电力供应链物流、电力征信、审计
	能源金融	电力资产证券化、电力供应链

金融、电力保险、电力数字票  
据、跨境支付

### 3) 分布式新能源消纳与交易。

在国家政策鼓励、技术进步和成本不断下降的背景下，新能源在能源供需结构与能源交易中的占比越来越大，也是能源产销者发挥生产作用的重要支撑。但分布式新能源发电容量在空间分布上更加分散，其固有的间歇性和波动性会增加配电网主动消纳调度的技术难度；另一方面，用户对新能源消费成本关注和激励的不确定性所带来的交易风险，都需要完善相应地市场激励机制及配套政策和技术保障。

因此，需要区域能源互联网在内部开展能源产销者直接交易机制设计；对内能够对用户用能行为进行监控和数据采集，从而实现需求侧管理闭环；基于长、中、短期负荷及新能源出力预测实现风、光、储集成优化，提高综合能源优化经济运行水平；对外则能在一级能源市场参与大用户直购电交易，在二级能源流通市场参与发电权交易，碳排放和绿证交易，并能参与调峰、调频、备用相关辅助服务市场交易。

### 4) 多能互补。

实现风、光、热、电、气、冷等多能源品种在时间和空间维度上的互补共济，提高能源综合利用率，是区域能源互联网系统的核心内容<sup>[40]</sup>。其中，涉及能源转换与存储，多能源系统在能源需求侧的统一规划、运行优化及评价等相关技术。具体来说，面向风光等间歇性可再生能源消纳需求，需进一步研究电储能系统的最优充放电方法、电采暖-热储能协同优化调度方法，以及电动汽车时空有序充电策略；针对电/气/热/冷等能源品种之间、多类型用户负荷之间动态响应特性以及能源转换、变换、转化关系，分析多时空尺度下的多能互补特性及耦合机理；计及运行可靠性、经济性、能效提升等多目标、多阶段、多约束条件，建立多时空尺度下的源/网/荷/储协同调度模型；分析日前/日内/现货等不同时间尺度区域级电力市场下，源/网/荷/储资源的调度成

本与效益；设计满足市场主体交易互动的收益模型与激励机制；综合考虑负荷/电价预测结果、市场交易信息和系统运维成本，建立综合能源系统优化调度模型，从而实现系统整体效益最优。

#### 5) 需求侧响应与虚拟电厂。

灵活发电系统、储能调节、可控负荷是需求侧响应的有效**实施手段(核实该词)**；市场价格信号和激励机制是需求侧响应的触发条件；用户用电行为改变，进而有效平抑能源供需波动，并获取激励收益，是需求侧响应实施的结果<sup>[41]</sup>。结合高速网络通信技术,对分散的需求响应进行统一实施优化与管理，并能参与电网运行调度及电力市场化交易，也是聚合多利益主体虚拟电厂（多虚拟能源产销者）的技术要求。

因此，同样需要考虑虚拟电厂中分布式电源出力的不确定性以及用户负荷的行为特性，设计适应虚拟电厂参与的能源交易品种、周期和市场运营规则和面向两级能源市场的报价/竞价策略。根据虚拟电厂参与市场交易的功率大小、调控范围和网络安全约束，考虑市场交易类型和时间尺度，进一步研究虚拟电厂参与下的市场交易模型、偏差处理方法与结算模型；同时考虑虚拟电厂参与辅助服务市场的类型、合理补偿机制和结算模型；构建适应虚拟电厂内部利益主体间的协同调度方法，实现日前、日内、实时等不同阶段的滚动优化调度。

#### 6) 群体智能代理。

高精度传感装置、高速通信网络、量测、控制、计量等大量边缘设备的接入，给集中式的数据存储和计算模式带来了更大的挑战。结合边缘计算的群体智能代理技术，能够主动响应上级电网的数据上传服务和协同计算请求,共同为维护整个系统在合理区间发挥决策支持作用；通过群体间能量流、信息流、业务流的智能交互，在保证自身稳定运行的同时，能够获取可预期的经济收益，是区域能源互联网的基本运行形态。基于多智能体机器学习与多主体博弈理论实现 2 方面内容：一是群体智

能调度与控制，既能根据上级能源调度机构的控制指令，结合本地有限信息保证子系统内源、网、荷、储等要素单元的功率平衡、优化和运行稳定性，又能与临近子系统进行能量与信息交互，为大系统安全稳定运行贡献必要的能量传输通道或信息冗余，降低系统运行成本；二是从时段、类型、地域等维度对区域能源供需特征进行分析与学习，不断提高用户智能代理预测分析的准确度，并能根据短期/实时能源市场交易信息，自主参与能源交易和辅助服务，获取收益。

#### 7) 建模仿真。

针对多能互补运行状态的建模与仿真，是开展区域能源互联网规划设计、运行调度、决策评价的数据分析理论基础。首先对能源的分配、转换、存储进行机理分析，在时间、空间和动作上构建模型，然后在元器件设备级和网络系统分析级 2 个层面，能对模型中的关键参数进行动态辨识。

在元件分析上，要考虑到电-热耦合、气-电耦合、气-热耦合和通信元件的复杂性；在时间上，既要分析单一能源品类运行动态环节，也要考虑不同能源品类间转化的相互影响，以及不同通信速率下的分析效率；在空间上，既要考虑大范围内的能源平衡和互济，也要保证能源在局部区域内的消纳与优化；在动作上，既要考虑系统的连续环节，也要考虑不连续环节的影响。此外，仿真分析技术还要满足系统规划、评估和运行分析等不同业务应用对分析时间尺度的要求。

## 4 价值场景分析

构建“阶段-属性-价值”的三维场景，分析区域能源互联网的价值场景。其中，阶段维度包括泛在物联、信息互动和网络智能 3 个阶段，属性维度包括技术应用、业务类型和商业模式 3 个层次，价值维度包括售电、交易和生态系统 3 方面内容。整体构成如图 7 所示。



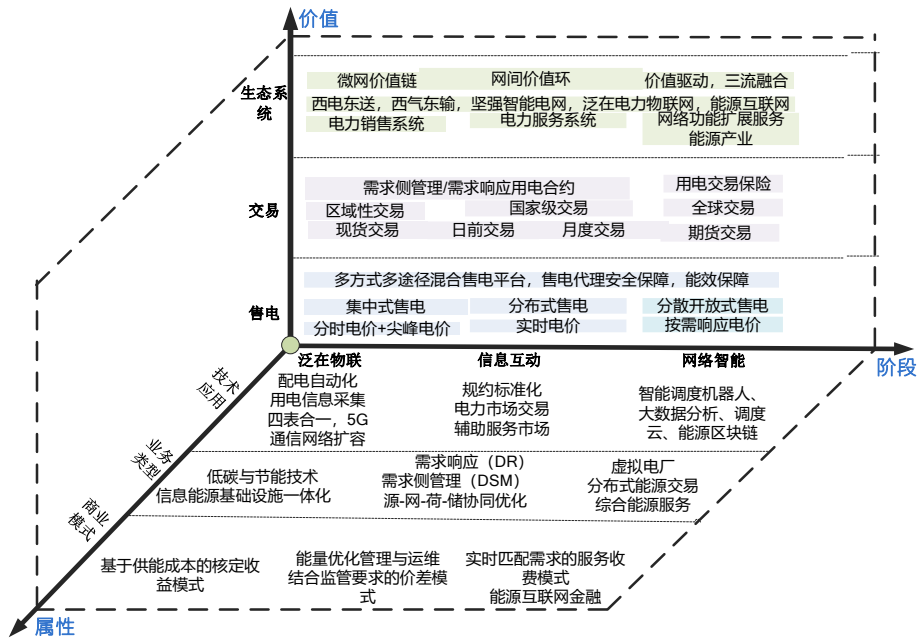


图7 区域能源互联网阶段-属性-价值场景分析

Fig. 7 Stage-Property-Value Scene Analysis in REI

分阶段分析区域能源互联网的价值应用场景:

1) 以泛在化、物联化连接为特征的第一阶段, 解决的是物理系统运行环境数字化问题。在电网管道侧是以数字化变电站、调度自动化、用电信息采集、配电自动化、智能配变台区、输变电设备状态在线监测等数字化应用为特征。过去十多年的数字化投入使电网管道侧基本达到了泛在物联的要求, 使得整个电能输送管道处于“可观测”水平, 即在虚拟网络世界里实现了物理电网向逻辑电网的抽象和“数字孪生”。但在面向用户能源需求的综合能源侧, 泛在物联还处于初级阶段, 以园区自动化、用电侧数字化为特点构建能源信息一体化基础设施, 目前还存在政策瓶颈和较大的数字化发展缺口。在价值连接阶段, 区域能源互联网主要还是以集中式售电为主, 采用基于供能成本的核定收益模式和基于“分时电价+尖峰电价”的电力营销系统, 实现能源价值链闭环。

2) 以信息互动为特征的融合阶段, 它是在第一阶段实现的前提下, 解决如何利用这些数据进行高效能源管理的问题, 简单来说就是能源管理的信息化、网络化、互动化。在电网管道侧, 过去多轮持续性的信息化投资建设, 目前基本已经实现了能源管理信息化, 如生产、营销、调度、财务、安监等部门的信息化都处于领先水平。通过新一代调度控制系统的完善建设, 也打通了生产和营销信息化系统的数据标准化交互问题, 实现了基于电网输送管道的源-网-荷高效协同优化。但在面向用户能源需

求的综合能源系统侧的数字化水平较低, 其信息互动处于非常初级的阶段, 运行的大量小系统处于孤岛状态, 加上电、气、热等能源供给归属不同企业, 增加了管理难度。由于缺少完整的业务标准和信息模型交互标准, 增加了实现多能流协同互动的难度, 甚至连最基本的多能流管理信息化也还没有实现。随着能源供给市场化和专业化水平提高, 更多的能源公司在工商业园区、居住社区、乡村地区建设运营综合能源系统, 这会加快推动信息互动的标准化步伐。在价值融合阶段, 电力市场交易环境下的区域能源互联网除了售电以外, 也能根据市场能源价格波动情况开展需求侧响应与管理、辅助服务、能源套餐、能效管理等方式实现其价值链闭环。

3) 网络智能化服务的第三阶段。在电网管道侧, 作为自然垄断环节其管理相对封闭, 但其网架结构清晰, 网络通信相对可靠, 模型数据信息标准化程度高。这个环节的智能化服务体现在: 一方面基于运行数据的深度学习与智能分析为能源调度控制和交易闭环提供决策信息, 最终实现调度和交易机器人的广泛替代应用, 降低人工参与成本, 进一步减少错误决策损失; 另一方面基于开放公平的能源电力市场开展能源金融业务, 完善各方参与电网管道投资建设的激励机制; 在综合能源服务侧, 不断降低技术准入门槛, 以价格信号和服务需求串联起能源需求的点、线、面, 依靠巨大的用户资源流、能量流和信息流, 吸引更多的第三方参与进来, 构建起供需实时互动、多能高效互补的能源生态网络

平台体系，并能结合互联网金融、虚拟电厂等新的投融资方式和能源代理经济模式，不断丰富区域能源互联网价值链内涵。

## 5 结论与展望

用户是以电能为核心的能源互联网价值实现闭环的终端，而以用户用能需求为中心是体现区域能源互联网价值精髓的基本要求。关于区域能源互联网价值形态研究展望如下：

### 1) 能源云基础设施的安全性。

能源云基础设施是未来物理系统“源-网-荷-储”协同运行和信息系统“云-管-边-端”高效融合发展的产物。作为国民经济社会稳定发展的基础设施，保证其物理与信息网络安全性尤为重要。能源云基础设施中针对物理设备的控制与协调越来越依赖信息系统。当信息系统的准确性、完整性和安全性收到故意破坏时，就有可能导致保护动作元件误动，进而引发系统层面复杂的物理交互过程，最终威胁系统的整体安全。区域能源互联网作为能源云基础设施的重要组成部分，面临着同样的难题。

因此，需要将过去割裂开的网络信息安全理论（如入侵检测、数据加密、安全认证等）和物理安全保护理论（如继电保护、故障分析等）进行统一研究，分别从静态参数变化和动态运行过程分析角度，研究物理系统和信息系统故障发生时的交互影响机理；建立适应于能源云基础设施的系统安全评估与检测体系，并能有针对性地进行安全防护，提高系统的安全运行水平。

### 2) 多能流精细化建模、用能行为模型与参数辨识。

区域能源互联网下的供需特性呈现多样性、互动性和时变性特点。一方面存在不同能源品种之间的转化、转换、分配、存储等过程，这增加了信息能量母线模型的复杂性，需要对能源形态变换过程分别进行建模；另一方面，在市场零售价格放开和需求侧响应实施条件不断完善的前提下，用能行为成为影响系统运行和市场交易的重要因素，其中响应电量、响应速度、响应时间、实施频率和负荷恢复时间等特征量是用户行为建模的主要内容。此外，用户用能行为还会受到心理、决策机制、响应时滞和市场交易规则等因素的影响。5G 等高速通信网络、智能传感/计量装置的大规模部署提高了系统运行的可观测水平，云计算的普及则进一步降低了开展分析计算应用的成本，这些都为提高上述模

型参数的辨识精度和准确度提供了数据源基础和计算保障。

### 3) 用能数据驱动的智能机器学习模型的机理分析。

以深度学习、监督学习、强化学习等为代表的新一代机器学习方法，与泛在的能源运行监测数据相结合，它们通过自主学习获取用户用能模式、系统运行特征、优化问题求解等途径，期望最终实现非人工参与的群体智能决策与控制。但学习结果的概率性降低了方法的可用性，只有结合物理系统进行深入的机理分析，才能进一步提高这类智能学习模型的可信度。

### 4) 新发展形势下的能源生产关系调整。

以往针对区域能源互联网价值形态的研究侧重于借助技术手段实现生产效率提高与经济效益提升等生产力发展层面。依据马克思的政治经济学原理，生产力决定生产关系，生产关系对生产力有反作用力。电力体制改革使得能源电力行业逐步从封闭走向开放，势必会对电力行业过去形成的生产关系产生重大影响，进而释放出更大的生产力；根据现代经济学理论，电力行业输配电管道侧体现自然垄断性特征。在市场环境下，它对中小企业等用能需求市场主体的外部性影响还需要深入系统性的研究，才能在法律层面对这类既有商品属性又带有公共普惠属性的能源管道型企业进行有效监管和合理规制。

用户最终获取便捷高效的互联网服务的同时又赋能驱动互联网生态体系不断创新，这是互联网行业发展带来的启示。同样地，高效地用能服务与良好地用能体验也是区域能源互联网价值实现的最终目标，它是能源互联网产业标准化、平台开放和商业模式创新共同作用的结果。

## 参考文献（参考文献格式请根据附件《文献标准格式》整理为标准格式，不要有缺项，字母大小写也请规范）

- [1] Huang A, Crow M L, Heydt G T, et al. The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system: The Energy Internet [J]. *Proceeding of the IEEE*, 2011, 1(99):133-148
- [2] Randy H, Culer D E, Seth S, et al. An information-centric energy infrastructure: The Berkeley view [J]. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 2011, 1(1):7-22
- [3] 孙宏斌, 郭庆来, 潘昭光, 等. 能源互联网: 驱动力、评述与展望 [J]. *电网技术*, 2015, 39(11):3005-3013.  
SUN Hongbin, GUO Qinglai, PAN Zhaoguang, WANG Jianhui. Energy Internet: Driving Force, Review and Outlook [J]. *Power System Technology*, 2015, 39(11):3005-3013.
- [4] Mahammad A. Hannan, Mohammad Faisal, Pin Jern Ker, et al. A review

- of internet of energy Based Building Energy Management Systems: Issues and Recommendations [J]. IEEE Access, 2018, (6): 38997-39014
- [5] 曾鸣,武庚,李冉,王昊婧,孙辰军.能源互联网中综合需求侧响应的关键问题及展望[J].电网技术,2016,40(11):3391-3398.  
ZENG Ming, WU Geng, LI Ran Key Problems and Prospects of Integrated Demand Response in Energy Internet [J]. Power System Technology, 2016,40(11): 3391-3398
- [6] Lei Rao, Xue Liu, Le Xie, Wenyu Liu. Coordinated Energy Cost Management of Distributed Internet Data Centers in Smart Grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1): 50-58.
- [7] 董朝阳,赵俊华,文福拴,薛禹胜.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.
- [8] Eric Harmon, Utku Ozgur, Mehmet Hazar Cintuglu et al.The Internet of Microgrids: A Cloud-Based Framework for Wide Area Networked Microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(3): 1262-1274.
- [9] 贾宏杰,王丹,徐宪东,等.区域综合能源系统若干问题研究[J].电力系统自动化,2015,39(7):198-207.  
Jia Hongjie, Wang Dan, Xu Xiandong, et al. Research on some key problems related to integrated energy systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 198-207.
- [10] 田世明,栾文鹏,张东霞,梁才浩,孙耀杰.能源互联网技术形态与关键技术[J].中国电机工程学报,2015,35(14):3482-3494.  
TIAN Shiming, LUAN Wenpeng, ZHANG Dongxia. Technical Forms and Key Technologies on Energy Internet [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14):3482-3494.
- [11] 周海明,包喜春,赵琦.能源互联网结构及其典型应用模式[J].中国电机工程学报,2017,37(22):6619-6626+6774.  
ZHOU Haiming, BAO Xichun, ZHAO Qi. Research on the Framework and Typical Application Pattern of the Energy Interconnection [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(22):6619-6626+6774.
- [12] 马钊,周孝信,尚宇炜,盛万兴.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, SHENG Wanxing. Exploring the Concept, Key Technologies and Development Model of Energy Internet [J]. Power System Technology, 2015, 39(11):3014-3022.
- [13] Huaguang Zhang, Yushuai Li, David Wenzhong Gao, et al.Distributed Optimal Energy Management for Energy Internet[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(6): 3081 - 3097
- [14] R. de Azevedo, M. H. Cintuglu, T. Ma, and O. Mohammed, Multiagent-based optimal microgrid control using fully distributed diffusion strategy[J]. IEEE Trans. Smart Grid, 2017, 8(4): 1997-2008.
- [15] 曾鸣,杨雍琦,刘敦楠,曾博,欧阳邵杰,林海英,韩旭.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(01):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(01):114-124.
- [16] 刘敦楠,徐尔丰,许小峰.面向园区微网的“源-网-荷-储”一体化运营模式[J].电网技术,2018,42(03):681-689.  
LIU Dunnan, XU Erfeng, XU Xiaofeng. “Source-Network-Load-Storage” Integrated Operation Model for Microgrid in Park[J]. Power System Technology, 2018,42(03):681-689.
- [17] H. Hua, Y. Qin, C. Hao, and J. Cao. Optimal energy management strategies for energy Internet via deep reinforcement learning approach [J]. Appl. Energy, 2019, (239):598-609.
- [18] H. Hua, Y. Qin, C. Hao, and J. Cao. Stochastic optimal control for energy Internet: A bottom-up energy management approach [J]. IEEE Trans. Ind. Inform. 2019, 15(3): 1788-1797.
- [19] 邓思成,陈来军,郑天文等.考虑系统延时的微电网有功功率分布式控制策略[J].电网技术,2019,43(05):1536-1542.  
DENG Sicheng, CHEN Laijun, ZHENG Tianwen, et al. Active Power Distributed Control of Microgrids Considering System Time Delays[J]. Power System Technology, 2019,43(05):1536-1542.
- [20] 王继业,孟坤,曹军威,程志华,高灵超,林闯.能源互联网信息技术研究综述[J].计算机研究与发展,2015,52(05):1109-1126.  
Wang Jiye, Meng Kun, Cao Junwei, et al. Information Technology for Energy Internet : A Survey[J]. Journal of Computer Research and Development, 2015,52(05):1109-1126.
- [21] 吴克河,王继业,朱亚运.基于 OSI 的能源互联网模型研究[J].中国电机工程学报,2017,37(03):685-696.  
WU Kehe, WANG Jiye, ZHU Yayun. Study of Energy Internet Model Based on OSI[J]. Proceedings of the CSEE, 2017,37(03):685-696.
- [22] 宋永华,林今,胡泽春等.能源局域网:物理架构、运行模式与市场机制[J].中国电机工程学报,2016,36(21):5776-5787+6020.  
SONG Yonghua, LIN Jin, HU Zechun et al. Energy Distribution Network: Infrastructure, Operation Mode and Market Mechanism [J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(21):5776-5787+6020.
- [23] 盛万兴,段青,梁英,等.面向能源互联网的灵活配电系统关键装备与组网形态研究[J].中国电机工程学报,2015,35(15):3760-3769.  
Sheng Wanxing, Duan Qing, Liang Ying, et al. Research of power distribution and application grid structure and equipment for future energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(15): 3760-3769(in Chinese).
- [24] 王印峰,陆超,李依泽,熊春晖,方陈,凌平.一种配电网高精度快响应同步相量算法及其实现[J].电网技术,2019,43(03):753-761.  
WANG Yinfeng, LU Chao, LI Yize, et al. A High-accuracy and Fast-response Synchronphasor Algorithm and Its Implementation for Distribution Network[J]. Power System Technology, 2019,43(03):753-761.
- [25] 孙秋野,滕菲,张化光等.能源互联网动态协调优化控制体系构建[J].中国电机工程学报,2015,35(14):3667-3677.  
SUN Qiuye, TENG Fei, ZHANG Huaguang et al. Construction of Dynamic Coordinated Optimization Control System for Energy Internet[J]. Proceeding of CSEE, 2015,35(14): 3667-3667
- [26] 孙秋野,王冰玉,黄博南等.狭义能源互联网优化控制框架及实现[J].中国电机工程学报,2015,35(18):4571-4580.  
SUN Qiuye, WANG Bingyu, Huang Bonan, et al.The Optimization Control and Implementation for the Special Energy Internet[J]. Proceeding of CSEE, 2015,35(18): 4571-4580
- [27] 中共中央,国务院.中共中央、国务院关于进一步深化电力体制改革的若干意见[Z].北京:中共中央,国务院,2015.
- [28] 王锡凡,肖云鹏,王秀丽.新形势下电力系统供需互动问题研究及分析[J].中国电机工程学报,2014,34(29):5018-5028.  
Study and Analysis on Supply-demand Interaction of Power Systems Under New Circumstances. Study and Analysis on Supply-demand Interaction of Power Systems Under New Circumstances [J]. Proceedings of the CSEE, 2014,34(29):5018-5028.
- [29] 马莉,范孟华,郭磊等.国外电力市场最新发展动向及其启示[J].电力系统自动化,2014,38(13):1-9.  
MA Li, FAN Menghua, GUO Lei, et al. Latest Development Trends of International Electricity Markets and Their Enlightenment[J].

- Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13):1-9.
- [30] 王剑晓,钟海旺,夏清等.基于价值公平分配的电力市场竞争机制设计[J].电力系统自动化,2019,43(02):7-18.  
WANG Jianxiao, ZHONG Haiwang, XIA Qing, et al. Competitive Mechanism Design in Electricity Market Based on Fair Benefit Allocation [J]. Automation of Electric Power Systems,2019, 43(02):7-18.
- [31] Jingkun Liu, Ning Zhang, Chongqing Kang, et al. Decision-Making Models for the participants in cloud Energy Storage[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018,9(6):5512-5521.
- [32] Chun-Cheng Lin, Der-Jiunn Deng, Chih-Chi Kuo, et al. Optimal Charging Control of Energy Storage and Electric Vehicle of an Individual in the Internet of Energy With Energy Trading[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(6):2570-2578.
- [33] Chun-Cheng Lin, Der-Jiunn Deng, Wan-Yu Liu. Peak Load Shifting in the Internet of Energy With Energy Trading Among End-Users[J].IEEE Access, 2017, 5(1):1967-1976
- [34] 倪琳娜,文福拴,尚金成,何洋.能源互联网环境下的信息经济学初探[J].电网技术,2016,40(06):1612-1619.  
NI Linna, WEN Fushuan, SHANG Jincheng. A Preliminary Investigation on Information Economics in Energy Internet Environment [J]. Power System Technology, 2016, 40(06):1612-1619.
- [35] 孙秋野,胡旌伟,张化光.能源互联网中自能源的建模与应用[J].中国科学:信息科学,2018,48(10):1409-1429.  
Qiuye SUN Jingwei HU Huaguang ZHANG. Modeling and application of we-energy in energy Internet [J]. Scientia Sinica(Informationis), 2018, 48(10):1409-1429.
- [36] 王毅,陈启鑫,张宁,冯成,滕飞,孙铭阳,康重庆.5G 通信与泛在电力物联网的融合:应用分析与研究展望[J].电网技术,2019,43(05):1575-1585.  
WANG Yi, CHEN Qixin, ZHANG Ning, et al. Fusion of the 5G Communication and the Ubiquitous Electric Internet of Things: Application Analysis and Research Prospects[J]. Power System Technology, 2019,43(05):1575-1585.
- [37] 曹军威,孟坤,王继业,等.能源互联网与能源路由器[J].中国科学:信息科学,2014,44(6):714-727.  
Cao Junwei, Meng Kun, Wang Jiye, et al. An energy internet and energy routers[J]. Scientia Sinica Informationis, 2014, 44(6): 714-727(in Chinese).
- [38] 张宁,王毅,康重庆,等.能源互联网中的区块链技术:研究框架与典型应用初探 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(15):4011-4022.  
ZHANG Ning, WANG Yi, KANG Chongqing, et al. Block-chain technique in the energy internet: preliminary research framework and typical applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(15):4011-4022.
- [39] 邵雪,孙宏斌,郭庆来.能源互联网中基于区块链的电力交易和阻塞管理方法[J].电网技术,2016,40(12):3630-3638.  
TAI Xue, SUN Hongbin, GUO Qinglai. Electricity Transactions and Congestion Management Based on Blockchain in Energy Internet[J].Power System Technology, 2016,40(12):3630-3638.
- [40] 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(04):2-10+46.  
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(04):2-10+46.s
- [41] 曾鸣著.电力需求侧响应与管理[M].北京:中国电力出版社,2011.
- [42] 卡尔马克思著.资本论[M].北京:人民出版社,2004.



郭健

收稿日期: 2019-6-15。

作者简介:

郭健(1987),男,博士后,助理研究员。主要研究方向:能源互联网,电力市场经济。E-mail: guoj2019@tsinghua.edu.cn;

曹军威(1973),男,博士,研究员,主要研究方向:能源互联网,先进信息技术;

杨洋(1989),男,博士,工程师,主要研究方向:电力系统分析与控制、综合能源系统优化设计和能源大数据应用。

(责任编辑 徐梅)