

互联网与能源系统的融合形态与技术

张勇军¹, 李立涅^{1,2}, 陈泽兴¹, 徐敏², 刘平¹, 蔡泽祥¹, 韩永霞¹, 许爱东²

(1. 华南理工大学电力学院, 广州 510641; 2. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广州 510080)

摘要: 基于互联网技术和互联网思维推进能源系统与信息网络的深度融合, 构建多种能源优化互补、供需互动开放共享的能源系统和生态体系, 是能源系统发展的新趋势。本文基于互联网技术发展的背景, 阐述了互联网与能源系统融合的驱动力, 探究了互联网与能源系统融合的基本形态, 提出了互联网与能源系统融合的分阶段发展形态, 即智能化、透明化、智慧化; 最后, 提出了互联网与能源系统融合的相关关键技术。

关键词: 互联网思维; 互联网技术; 能源系统; 融合

中图分类号: TM71 **文献标识码:** A

Fusion between Internet and Energy System: Morphology and Technology

Zhang Yongjun¹, Li Licheng^{1,2}, Chen Zexing¹, Xu Min², Liu Ping¹,
Cai Zexiang¹, Han Yongxia¹, Xu Aidong²

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 2. Electric Power Research Institute, China Southern Power Grid, Guangzhou 510080, China)

Abstract: On the basis of Internet technology and thinking, a new trend in energy system development has emerged that promotes the deep integration of energy and information in order to construct an open and shared energy system and ecosystem, with mutual complementation and optimization between multiple energies and the interactive supply and demand relationship. Against the back of the development of Internet technology, this paper expounds the drivers of the fusion between the Internet and the energdrop system. Then, the basic morphology of the fusion of the Internet and the energy system is described. Moreover, a three-level progressive thinking for the trend of fusion morphology, i.e., from smart energy systems to transparent ones, and then to a intelligent one, is put forward. Finally, the key technologies for the fusion between the Internet and the energy system are proposed.

Keywords: Internet thinking; Internet technology; energy system; fusion

一、前言

由于资源、环境和气候的多重压力, 我国能源

体系转型升级已提升到能源革命的国家战略, 包括能源结构的低碳化、化石能源清洁化、能源消费总量控制及能源服务的普惠便捷 [1~4]。应用互联网

收稿日期: 2018-03-13; 修回日期: 2018-03-26

通讯作者: 张勇军, 华南理工大学, 教授, 主要研究方向为电力系统无功优化、能源互联网运行与控制; E-mail: zhangjun@scut.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“‘互联网+’行动计划的发展战略研究”(2016-ZD-03)

本刊网址: www.enginsci.cn

技术与机制改造传统能源行业的生产、传输、消费过程，实现“互联网+”智慧能源创新，是近年来蓬勃发展的学术前沿和工程热点领域。

近年来，互联网以其便捷、开放且可实现资源的公开共享、实时交互等优势，被广泛用于改造传统的行业[5~7]。相比其他领域，能源系统较为封闭，基于互联网对能源系统的改造和创新面临一系列技术与行业壁垒的挑战[8~10]。国内外有代表性的探索工作有：美国研发了未来可再生能源传输与管理系统（FREEDM系统），提出了能源路由器的概念并进行了原型实现[11]；德国联邦经济和技术部发起E-Energy计划，在此基础上创建基于信息和通信技术（ICT）的高效能源系统[12]；日本着力于对“数字电网”的构建，其核心在于电力路由器的研发[13]；我国则以能源革命战略与电力体制改革为契机，掀起“互联网+”智慧能源研究与实践的新浪潮[14~16]，主要包括：国务院发布了《国务院关于积极推进“互联网+”行动的指导意见》，其重点行动领域包括以互联网实现能源系统的升级，即“互联网+”智慧能源；国家能源局、国家发展和改革委员会发布的《能源技术革命创新行动计划（2016—2030年）》将能源互联网技术创新列为一项重点任务；开展一系列能源互联网示范项目建设等。上述多种措施的探索使能源系统与互联网朝融合的方向迈进了一步，但对互联网与能源系统融合的总体愿景、实施路径规划还缺乏总体描述。

二、互联网与能源系统融合的驱动力

（一）推动能源供给革命，提高新能源消纳能力

能源供给革命是能源革命的重要支撑。其主要内容涉及煤炭的清洁高效利用，发展非化石能源，形成煤、石油、天然气、核能、新能源、可再生能源等多能源供应体系[17]。面向能源供给革命的基本诉求，推动能源供应体系的转型升级核心在于提高可再生能源的利用比例，并基于新能源利用比例的提高，调整能源利用结构，实现能源结构由高碳能源向低碳能源发展，解决能源资源难以为继以及生态环境不堪重负的问题。我国新能源装机容量正在高速增长，已成为世界上最大的太阳能发电国，但当前新能源消纳能力还有待提高。传统电网调节能力有限，面对未来新能源不断渗透的场景，仅仅

依靠电网来进行消纳会显得不足。互联网与能源系统的融合，将集合互联网中的共性技术，如云计算、大数据等，提升能源系统的灵活性，高比例地利用间歇性、分布式的可再生能源，建设可持续的、多元化的能源供应体系。

（二）推动能源消费革命，提高能源综合利用效率

将传统重视源端的节能改造转移到用户终端，是能源系统转型升级的另一重要举措。对于传统电网，电力终端能效提升的技术除了一般的更换更节能的设备以外，更重要的技术措施还是实施电力需求侧管理。电力需求侧管理指的是电力企业采用行政、技术或者经济等手段，与用户共同协力提高终端用电效率、改变用电方式。近年来，我国的用户侧电力能效提升技术发展迅速，在节能降耗、维护生态环境方面起到了至关重要的作用。但仍存在不少问题，如监测用户能耗数据不健全，控制用能系统的设备落后等，这些都有待进一步解决。但是，实际上对于用户来说，用能的需求除了电力，还有天然气、用热、用冷的用能需求，如果能综合考虑这些能源，进行终端能源的综合优化，利用不同能源之间的互补性，将进一步提升能源综合利用效率。因此，互联网与能源系统的融合，将基于互联网技术，实时获取海量的用户数据来进行数据挖掘，进一步提升用户节能空间。

（三）推动能源体制革命，提供市场化所需技术支撑

能源体制革命是能源革命的制度保障。在能源体制革命中，明确提出了要构建有效竞争的市场结构和市场体系，形成主要由市场决定能源价格的机制，转变政府对能源的监管方式，并且建立健全能源法治体系[17]。要实现上述目标，还原能源的商品属性是关键，利用市场机制、经济学去引导能源的生产及消费，将会有效地促进能源资源利用效率的提高。

能源体制革命一方面需要制度保障，另一方面也需要技术的支撑。事实上，我国电力市场的概念已提出多年但成效不显著，随着“能源互联网”“互联网+”智慧能源等概念的提出，多能源耦合成为趋势，相比之下，多能源市场的开放相比单一的仅提供电力市场将更加能够促进资源的互通和有效利用。互联网与能源系统的融合正是在技术层面

上提供了一个以互联网开放共享的环境,打破行业壁垒,实现能源信息的透明化,利用大数据技术分析能源流动的各个环节,感知用户需求,为能源市场的建立提供技术保障。

三、互联网与能源系统的融合形态

(一) 互联网与能源系统融合形态的基本描述

广义的能源系统包括了能源生产-传输-存储-转换-消费等五个环节,能源形式多样,包含煤炭、石油、天然气、可再生能源等一次能源,电、氢等二次能源,能源传输网络包含了电网、天然气网、供冷/热网等。互联网技术与能源系统的融合,正是希望借助互联网信息获取和处理技术,实现能源系统全环节的感知和运行优化,促进能源结构的优化和能源利用效率的提升;而互联网思维与能源系统的融合则是借助共享、开放的互联网平台,推动能源系统全环节产业升级,以开放的环境激活能源系统市场。能源系统与互联网融合的示意图,如图 1 所示。

图 1 以两个圆交叠的形式抽象地描绘了能源系统与互联网融合的两个网络,重叠的部分可看成互联网与能源系统融合的程度,交叠部分越多,则表示融合的程度越深。随着互联网技术与思维在能源

系统中应用的逐步渗透,将逐步推进互联网与能源系统的融合。结合互联网与能源系统的融合程度,本文提出互联网与能源系统的分阶段融合形态,以 2020 年,2030 年及 2050 年为三个时间节点,分别称之为智能化、透明化、智慧化三个阶段。

(二) 融合形态 1: 智能化阶段

智能化是互联网与能源系统融合的初级形态。融合形态可具体描述为:以大规模远距离交直流输电系统为载体,实现化石能源与可再生能源的跨区域规模化资源配置;大力发展分布式电网/能源系统,集中配置与分布消纳并举,实现可再生能源的高比例消纳,减少弃风、弃光现象;基于高度自动化与智能辅助决策的实现,电网输电能力、运行可靠性及安全稳定水平得到充分提升,可避免大面积停电事故的发生。

具体来看,实现智能化阶段的关键路径在于推进互联网中大数据技术在能源系统中的应用,以能源大数据来提升能源系统的智能化水平。在能源的生产侧,基于大数据技术,整合气象、地理、环境、能源等多维度信息,可实现可再生能源功率的精准预测,实现可再生能源的高比例消纳,减少弃风、弃光现象,同时为能源结构的优化提供支持。能源消费侧重视智能电表、智能能源表计的推广应用,

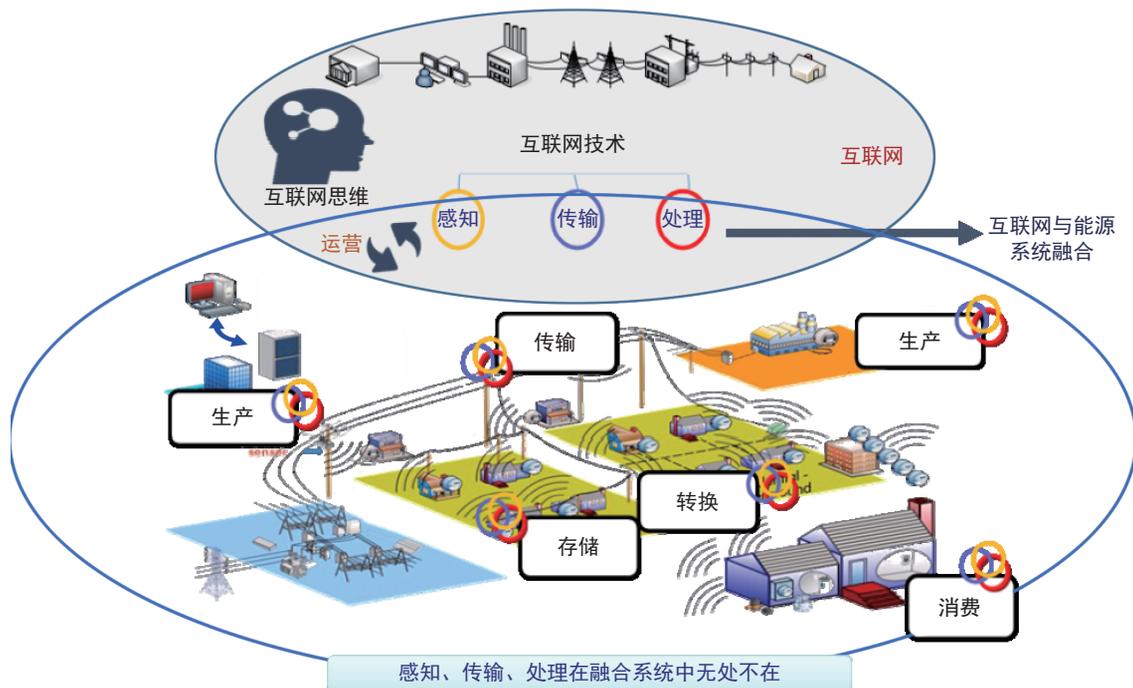


图 1 能源系统与互联网融合示意图

获取用户的用能信息并基于大数据分析充分挖掘用户的节能潜力，引导用户制定优质的用能计划。

（三）融合形态 2：透明化阶段

透明化是互联网与能源系统融合在智能化阶段的进一步升级，两者的融合程度进一步加深，打造透明能源系统。透明能源系统是指利用先进的互联网技术，如芯片传感技术，实现对能源系统中能源生产、能源传输、能源转换与存储、能源使用等全环节各类设备的信息监控和实时感知，使设备运转信息、能源系统的运行信息和能源市场信息实现透明共享、平等获取，是互联网与能源网技术深度融合下的能源系统的中级发展形态。

具体来看，实现透明化阶段的关键路径在于推进互联网中芯片传感器和智能决策技术的发展，以能源系统透明化为目的实现能源系统的转型升级。透明能源系统中能源系统的互联网化程度进一步加深，拥有先进的信息感知与处理技术，使电网与能源网的状态数据化与透明化，并且，人工智能等智能决策技术在能源系统中高度应用，使整个能源系统的状态变得高度可视、高度可控、高度优化。

（四）融合形态 3：智慧化阶段

智慧化是互联网与能源系统融合的高级形态。融合系统可具体描述为：基于智能化的能源装备与控制技术，优先实现高比例可再生能源的接入；此外，可再生能源的分布式广泛接入与用户侧的产销一体化，使能源的生产、传输、转换、消费及交易趋向零边际成本，实现能源系统效率最优化及能源价值最大化利用；互联网与能源系统深度融合，形成智慧化、深优化、高可靠性、能源触手可及的泛在能源网。

具体来看，实现智慧化阶段的关键路径在于基于互联网平台建立能源交易市场，推进能源产业转型升级。智慧化的融合模式中，一方面能源系统基于互联网的信息平台支撑，实现能源系统全环节的智慧化，即光伏、风能等新能源实现即插即用，能源需求可以得到满足，可实现随时、随地地使用能源；另一方面则应用互联网思维，将当下互联网环境下实施的较为成功的商业模式与能源系统及互联网平台有机结合，拓展出种类丰富的新型能源商业

模式，比如能源期货、能源团购、能源定制、能源点评等，激活能源行业，形成新的经济增长点。

四、互联网与能源系统融合的技术体系

为推进互联网与能源系统的融合，一方面需加强能源信息支撑技术的发展；另一方面则需注重互联网技术与思维在能源系统生产—传输—消费等环节的应用。互联网与能源系统融合的关键技术体系，如图 2 所示。

（一）能源信息支撑平台技术

以互联网作为信息基础支撑，是互联网与能源系统实现融合的重要技术，包括互联网基础设施建设以及信息感知、处理、交互、安全技术。

在基础设施建设方面，建设覆盖各类能源系统及其各环节互联网基础设施的需求，实现能源信息传输的光纤到户，以推动社会资源共享，突破信息网络的“最后一千米”瓶颈。

在信息感知技术方面，加强光纤温度传感器、芯片级传感技术的研制和开发，并在实际工程中实现推广应用；开展基于纳米光学的光纤传感技术、基于光纤传感技术的全光纤设备状态检测系统的研究，实现数据采集监控结果的实时性、精确性和完整性，推进信息感知技术的发展，实现能源系统信息透明化。

在信息处理技术方面，开展云计算技术研究，

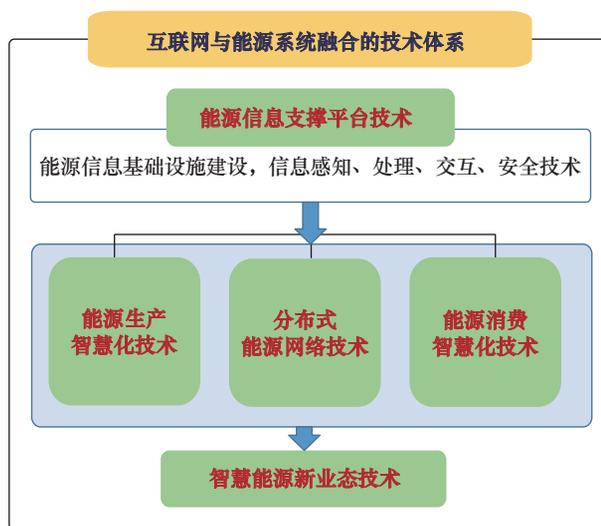


图 2 互联网与能源系统融合的关键技术体系

包括支撑信息化建设的虚拟化应用技术研究和企业云平台应用关键技术研究；开展大数据技术研究，包括基于海量信息挖掘技术的分析、通过智能化技术建立“智能、高效、可靠、绿色”的数据中心管理体系；研究高性能计算技术，开发高性能计算的基础环境仿真平台。通过虚拟化、标准化和自动化的方式有机整合能源系统的硬件和软件资源，有效支撑基础数据进行可靠有效的传输、存储和处理。

在信息交互技术方面，推进移动互联网在能源系统的应用，通过掌上终端、服务器、个人计算机等多平台的信息交互，实现能源业务、管理以及服务的移动化、信息化、电子化和网络化。研究与信息交互相关的智能科学技术，重点是人工智能在信息交互技术中应用的研究，通过人工智能技术实现人与能源系统之间智能的交互界面，将能源系统调整到最佳的状态来适应人类的需要，提高能源系统的运行效率。

在信息安全技术方面，开展云安全体系研究，解决云计算在实际应用中面临的安全问题，包括云安全技术体系、管理体系和评价检测体系等，确保云计算系统安全稳定运行。构建能源系统物联网安全体系架构并开展物联网应用信息安全体系研究。从用户端着手规划“数据安全体系”，解决由于云计算、移动互联网带来的系统边界模糊化而导致的安全防护难题。

（二）能源生产智慧化技术

1. 建立开放、共享、标准和集成的能源生产信息公共服务网络

基于互联网建立面向海量能源主体接入的能源生产信息公共服务网络，为能源生产、传输与消费全产业链生态链提供信息交互对接的基础平台。“开放”在于能源生产信息公共服务网络可由能源生产全产业链中所有用户自由接入，随时获取能源生产信息；“共享”在于能源生产、传输、消费各环节的运行状态和交易互动等信息可跨环节、无缝地传输及获取；“标准”在于任意的能源生产、传输及用能设备并网接入后，需通过标准化数据共享协议在能源生产信息公共服务网络实现设备状态数据发布与共享；“集成”在于能源生产信息公共服务网络集成能源生产的监测、运行、管理和调度等高级应用于一体。

2. 基于大数据的新能源发电智能调度技术

融合新能源设备状态数据、电网运行数据、气象数据等多源数据，建立面向随机间歇性电源的智能化调度技术，充分提升新能源的消纳水平，减少甚至避免弃风、弃光现象。基于多源数据的数据挖掘与智能分析手段，研究高精度的新能源发电预测方法；综合新能源电源与电网运行状态信息数据，研究自适应的智能化随机调度策略；考虑新能源的海量时空分布特点，研究集中决策-分布控制的新能源发电分层分级协调控制方法等。

（三）分布式能源网络技术

1. 基于互联网及大数据的能量管理技术

依托互联网与大数据平台构建适应分布式多能流能源网络的能量管理体系，实现电、气、热、冷等能源资源协调运行与优化配置。主要关键技术包括：构建智能化高级量测体系，实现多样化能源的精准量测、数据分析、信息交互及实时结算；计及间歇性电源和随机性负荷的历史行为与实时状态，融合电、气、热、冷、智能交通等多网信息，并在此基础上研究源-荷匹配的智能化调度潜力预测与挖掘技术；研究分布式能源网络中能源生产-传输-消费-存储多能流协同的能量优化调度技术，实现多样化能源的综合互补与能源供应的协同管理。

2. 分布式能源系统的信息透明化

分布式能源系统的信息透明化技术是指利用先进的“互联网+”技术，实现对分布式能源系统中的源、网、荷、储、用全环节各类设备的信息监控和实时感知，使设备运转信息、能源系统运行信息和能源市场信息实现透明共享、平等获取。以分布式能源系统中设备与网络运行状态的透明化所产生海量的实时状态数据为基础，可实现分布式能源系统运行调度决策的智能化，支撑可再生能源的广泛接入与精准发电预测，实现高比例可再生能源的消纳，科学分配需求侧负荷以及提取关键信息实现状态估计与故障辨识。此外，透明化的分布式能源系统以信息透明对等为支撑，可促进分布式能源就近交易并获取，用户逐渐成为能源的产销者，并以互联网交易和共享促进能源交易和增值服务。

3. 泛在的分布式能源网

泛在的分布式能源网是能源和信息深度融合的系统，能源网络中的所有接入设备，其二次部分类

似于信息网络中的节点单元，具备存储设备特性参数，实时监测记录其自身运行状态、运行参数的功能，并依据统一的通信规约和协议，通过物联网在小微能源网络内部实现信息的充分共享和交互。泛在的分布式能源网对于接入设备而言，具有高度灵活的可接入性、可扩展性，以及信息分享的广泛性和安全性。因此可适应各类可再生小微能源的接入，逐渐形成泛在能源网，打破时空限制，实现能源的随时随地接入与使用。针对泛在分布式能源网的特点，可以总结出其关键技术有：①传感器技术。需要通过射频识别（RFID）等传感技术随时准确获取终端的信息。②数据传输。通过有线或无线网络实现终端的信息传输。③嵌入系统技术。综合计算机软硬件、集成电路技术等，对接收到的信息进行分类处理。

（四）能源消费智慧化技术

1. 基于互联网平台的能源交易与多元互动

利用互联网的信息共享与实时互动的特点，建设面向能源供应商、能源用户、大数据服务商等多元化主体的能源交易与能源服务平台，实现各市场主体信息共享与交易互动的公平化、自由化、透明化。构建能源交易网上业务平台，提供PC端、移动端等实时访问交互渠道；具备多样化服务扩展能力，为能源资源信息公开发布、用能合理精准匹配、用能个性化定制等新服务形态提供技术支撑；建立各类能源主体客户管理体系，实现客户营销统计分析、潜在客户挖掘与跟踪，为客户建立“绿色用能”和“绿色发电”数字化信息档案，提供个性化信息定制服务及用能优化解决方案等增值服务。

2. 基于数据挖掘的用户侧能效管理与需求侧响应

以能源大数据为核心，围绕用户侧用能特征、能效水平、调度潜力等问题进行深入挖掘与分析，实现融合控制、优化、诊断、维护等的综合能效管理。通过智能表计与物联网技术实现用能设备、用户侧分布式电源及储能系统的数据采集、处理与显示；建立考虑电池储能优化配置与电动汽车有序充放电的实时调度系统，使用户侧负荷柔性化，满足尖峰负荷需求及提供移峰填谷响应能力；基于云计算与智能决策技术处理分析能源大数据，辨识用户用能行为特征模式及可调潜力，联动能源市场实时

价格机制和用户互动需求，以降低用能成本和提升能效水平为目标参与需求侧响应。

（五）智慧能源新业态技术

1. 基于电力光纤到户推进四网“资源”融合

以电力光纤技术为基础支撑，推进电信网、互联网、广播电视网和电力网信息资源的融合。电力光纤到户是指在低压通信接入网中采用光纤负荷低压电缆（OPLC）等线缆，实现到表到户。利用光纤数据传输精度高、速度快的特性，承载信息内容的用户用电信息采集业务；集光纤和电力输配于一身，避免二次布线，实现信息到达用户“最后一千米”成本的降低；使用OPLC配合相应的设备和器件，可在一根传输线上实现多种业务，如交互式网络电视（IPTV）、互联网、电话等，具有较强的适应性和拓展性。

2. 开发电动汽车商业模式，实现跨界融合

电动汽车作为一种新的技术，其大规模市场化后带来的新型商业模式，促进了能源、交通、金融和互联网的跨界融合。建立充电站综合信息管理系统，可实现充电预估、开放充电商业模式、移动终端管理，是智能电网和互联网领域的入口及关键技术；利用电动汽车作为能源网和交通网融合的枢纽，完善能源网和交通网间基础设施的融合，提高通用性，促进服务主体多元化；打造ICT平台，增强电动汽车价值链参与者间的联系和互动，实现商业模式消费电子化；电动汽车与电力系统完善融合，成为智慧能源系统的核心之一，发挥多元作用。

3. 能源系统的增值服务技术

以互联网数据处理、传输为基础，围绕新的能源商业模式展开的管理和运营，可有效实现在线运营维护、能源定制与租赁服务、能源金融服务、媒体广告服务增值服务等增值服务。基于智能化的用户设备运行数据，运营维护公司可线上管理用户发电设备，降低故障率和上门维修概率，极大地提高运营维护和生产效率；根据用户需求和用能特点，为用户提供定制化、专业化的能源服务，提供电力能源设备的租赁和二手市场服务，可提高资产利用效率；基于能源与金融之间的资源整合，不断地推进能源行业与金融行业两者优势相结合，进而实现能源产业优化发展；利用能源管

理平台、智能交通平台等多种渠道实现客户群体信息的有效分析和管理的, 实现广告的精准投放。

五、结语

互联网与能源系统的融合是能源行业的互联网化, 将实现传统能源行业的智慧化升级, 在供给侧实现能源生产的智慧化, 有利于大规模消纳新能源; 在需求侧支撑智慧用能, 提升能源利用效率; 在能源网络实现其智慧化, 有助于多能互补与新能源即插即用。同时, 基于互联网技术与互联网平台, 推进能源市场化改革, 还原能源商品属性, 带动能源产业升级和新业态, 创造新的经济增长点。

为实现互联网与能源系统的融合, 还应在政策层面上加以引导。如加强多能源网络供给侧结构性改革, 补齐多能源物理互联和信息互联的基础设施短板; 进一步放开能源用户侧、配售侧、需求侧市场, 配电、售电由增量市场扩大到存量市场; 加强能源产业体系顶层设计; 完善市场法律法规, 形成长效机制, 加快制定并完善能源产业市场法律法规, 试点能源产业市场负面清单制度。

参考文献

- [1] 张东霞, 姚良忠, 马文媛, 等. 中外智能电网发展战略 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 1-14.
Zhang D X, Yao L Z, Ma W Y, et al. Development strategies of smart grid in China and abroad [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 1-14.
- [2] 李立涅, 张勇军, 陈泽兴, 等. 智能电网与能源网融合的模式及其发展前景 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40(11): 1-9.
Li L C, Zhang Y J, Chen Z X, et al. Merger between smart grid and energy-net: Mode and development prospects [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(11): 1-9.
- [3] Swaminathan M, Tarun D. Diffusion of innovation model of consumer behaviour—Ideas to accelerate adoption of renewable energy sources by consumer communities in India [J]. Renewable Energy, 2012, 39(1): 162-165.
- [4] 刘金朋. 基于资源与环境约束的中国能源供需格局发展研究 [D]. 北京: 华北电力大学(北京) (博士学位论文), 2013.
Liu J P. Development of the energy supply and demand pattern of China under the constraints of resources and environment [D]. Beijing: North China Electric Power University(Doctoral dissertation), 2013.
- [5] 黄勇军, 朱永庆. 新一代互联网发展趋势与技术浅析 [J]. 电信科学, 2013, 29(4): 1-6.
Huang Y J, Zhu Y Q. Analysis of development trend and technology of new generation Internet [J]. Telecommunications Science, 2013, 29(4): 1-6.
- [6] 董大海, 范志丽. 互联网思维是什么? [J]. 科技与管理, 2016, 18(6): 1-8.
Dong D H, Fan Z L. Internet thinking [J]. Science-Technology and Management, 2016, 18(6): 1-8.
- [7] 王继业, 孟坤, 曹军威, 等. 能源互联网信息技术研究综述 [J]. 计算机研究与发展, 2015, 52(5): 1109-1126.
Wang J Y, Meng K, Cao J W, et al. Information technology for energy Internet: A survey [J]. Journal of Computer Research and Development, 2015, 52(5): 1109-1126.
- [8] 张勇军, 陈泽兴, 蔡泽祥, 等. 新一代信息能源系统: 能源互联网 [J]. 电力自动化设备, 2016, 36(9): 1-7.
Zhang Y J, Chen Z X, Cai Z X, et al. New generation of cyber-energy system: Energy Internet [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(9): 1-7.
- [9] 田世明, 栾文鹏, 张东霞, 等. 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 S M, Luan W P, Zhang D X, et al. Technical forms and key technologies on energy Internet [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3482-3494.
- [10] 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(19): 1-8.
Sun H B, Guo Q L, Pan Z G. Energy Internet: Concept, architecture and frontier outlook [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015(19): 1-8.
- [11] Huang A Q, Crow M L, Heydt G T, et al. The future renewable electric energy delivery and management (freedm) system: The energy Internet [J]. Proceedings of the IEEE. 2011, 99(1): 133-148.
- [12] Vermesan O, Blystad L C, Zafalon R, et al. Internet of energy-connecting energy anywhere anytime [J]. Active Learning in Higher Education, 2011, 11(11): 189-200.
- [13] Boyd J. An Internet-inspired electricity grid [J]. IEEE Spectrum, 2013, 50(1): 12-14.
- [14] 孙毅, 许鹏, 单葆国, 等. 售电侧改革背景下“互联网+”电能替代发展路线 [J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3648-3654.
Sun Y, Xu P, Shan B G, et al. Road map for “Internet plus” energy substitution in electricity retail market reform in China [J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3648-3654.
- [15] 李立涅, 张勇军, 徐敏. 我国能源系统形态演变及分布式能源发展 [J]. 分布式能源, 2017, 2(1): 1-9.
Li L C, Zhang Y J, Xu M. Morphological evolution of energy system and development of distributed energy in China [J]. Distributed Energy, 2017, 2(1): 1-9.
- [16] 余晓丹, 徐宪东, 陈硕翼, 等. 综合能源系统与能源互联网简述 [J]. 电工技术学报, 2016, 31(1): 1-13.
Yu X D, Xu X D, Chen S Y, et al. A brief review to integrated energy system and energy Internet [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 1-13.
- [17] 刘龙海, 钟史明. 能源革命——领悟“四个革命”与“一个合作” [J]. 燃气轮机技术, 2016, 29(1): 1-8.
Liu L H, Zhong S M. Energy revolution——Grasp study “forth revolution” & “one cooperative” [J]. Gas Turbine Technology, 2016, 29(1): 1-8.