



国家能源互联网发展指标体系与态势分析

康重庆^{1,2}, 王毅¹, 张靖¹, 王永真¹, 高峰¹, 刘毅²

(1. 清华大学能源互联网创新研究院, 北京 100084;

2. 清华四川能源互联网研究院, 四川 成都 610200)

摘要: 能源互联网是新一轮能源革命的重要发力点, 将大力推动我国能源产业的高质量发展和可持续发展。为了从国家层面全方位分析我国能源互联网的发展情况, 首先回顾了能源互联网的发展背景, 分析了能源互联网的内涵与外延; 在此基础上, 从政策、产业、技术、创新、建设、公众生态 6 个方面构建了能源互联网发展的指标体系; 然后从这 6 个指标出发, 通过参考文献检索分析、官方网站检索、权威文件查阅等手段, 分析了我国能源互联网发展的基本现状和发展态势, 指出我国能源互联网在多部门多层级的政策保障下, 在产业、建设、技术与创新等方面处于健康繁荣发展的态势。

关键词: 能源互联网; 指标体系; 发展态势; 能源革命; 能源政策; 技术创新

中图分类号: TK9

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2019161

Development of national energy internet: index system and future trend

KANG Chongqing^{1,2}, WANG Yi¹, ZHANG Jing¹, WANG Yongzhen¹, GAO Feng¹, LIU Yi²

1. Energy Internet Research Institute, Tsinghua University, Beijing 100084, China

2. Tsinghua-Sichuan Energy Internet Research Institute, Chengdu 610200, China

Abstract: The energy internet is the fulcrum of the new energy revolution, which will vigorously promote the high-quality and sustainable development of China's energy industry. In order to comprehensively analyze the development of energy internet of China from the national level, the development background of energy internet was firstly reviewed, and then the connotation and extension was analyzed. On this basis, the index system of energy internet development was constructed from six aspects: policy, industry, technology, innovation, construction and public ecology. By means of literature search and analysis, official website crawler and authoritative document search, the basic status of energy internet development in China was analyzed. It was pointed out that under the multi-sectoral and multi-level policy guarantee, energy internet of China has shown a good development trend as a whole, with the healthy and prosperous development of industry, construction, technology and innovation.

Key words: energy internet, index system, future trend, energy revolution, energy policy, technology innovation

收稿日期: 2019-04-18; 修回日期: 2019-05-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.51620105007); 国家自然科学基金委员会—国家电网公司智能电网联合基金资助项目 (No.U1766212)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.51620105007), The Major Smart Grid Joint Project of National Natural Science Foundation of China and State Grid (No.U1766212)

1 引言

能源是人类生存发展的基石,是国民经济的基础性产业和重要的战略性物质资源。能源互联网是新一轮能源革命的支点,将大力推动我国能源产业的高质量发展和可持续发展。2016年2月,国家发展和改革委员会(以下简称发改委)、国家能源局、工业和信息化部(以下简称工信部)发布了国家能源互联网纲领性文件《关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见》(发改能源〔2016〕392号),从此我国能源互联网建设序幕正式拉开^[1]。从国家层面对能源互联网最近几年的发展进行有效的评估,能够对我国进一步的宏观政策制定、产业发展建议等提供有效的参考。构建全面能源互联网发展的指标体系,通过多元化的手段获取权威可信数据并计算相应指标是评估能源互联网发展的重要手段。

目前已有与能源互联网发展或者评价指标体系相关的研究。参考文献[2]从节能减排环保的角度构建了城市绿色电力指标体系,从电力供应、消费与供需协调等不同方面对电力的“绿色程度”进行指标综合。参考文献[3]针对能源互联网示范项目,从经济、能源、环境、社会 and 工程5个方面构建了相应的指标体系,并提出基于解释结构模型和层次分析法的能源互联网综合评估方法。参考文献[4]从能效的角度对园区能源互联网进行评估,将整个能源互联网项目分为能源供给、能源传输、能源消费和能源存储4个模块,分别构建相应的能效评估指标体系,并通过模糊算法进行综合评价。参考文献[5]重点关注如何解决能源互联网众多指标代表性弱、相关性强和重叠性广等问题。参考文献[6]在回归能源互联网基本定义的基础上,归纳了能源互联网中既有的性能评价指标,总结了若干可行的研究方法,并以某能源互联网示范项目为例进行了实证分析。参考文献[7]从能量品质、安全可靠、经济性、社会性、能

源结构优化、交互友好性、组织管理与商业模式、合理开放性8个方面构建了能源互联网的评价指标体系,为能源互联网项目的建设和验收提供了有效依据。参考文献[8]针对城市能源系统,从能源供给、能源消费、电能替代、能效提升、系统灵活等11个方面构建相应的评估指标体系,为城市能源战略发展给出建议。

综上,目前针对能源互联网发展指标体系的研究往往关注于某一个园区或者示范项目,侧重能耗低碳、工程实践等方面的具体情况,尚没有从国家视角对全国能源互联网的发展态势构建相应的指标体系。本文为了从国家层面全方位分析我国能源互联网的发展情况,尝试构建国家能源互联网发展指标体系。需要说明的是,本文旨在通过多方面的数据反映能源互联网发展态势,而不研究某一指标综合的具体方法。

本文将首先解读能源互联网的基本概念,在此基础上,从政策、产业、技术、创新、建设、公众生态6个方面构建了能源互联网发展的指标体系;指标体系的构建遵循了定量与定性结合、全局与局部结合,保证指标的可获取性、可复现性和可追踪性;然后从这6个方面出发,通过参考文献检索分析、官方网站检索、权威文件查阅等手段,分析了我国能源互联网发展的基本现状,指出我国能源互联网在多部门多层级的政策保障下,整体表现出良好的发展态势,产业、建设、技术与创新等方面健康繁荣发展。

2 能源互联网基本概念

本节将分析能源互联网的基本内涵和外延,然后从全球视角解读世界各国的能源互联网发展。

2.1 能源互联网内涵与外延

能源互联网目前处于实质性推进期,是试点示范工作向多元化、规模化发展转型的关键阶段,多方概念、结构、功能等不断吸收融合,逐渐形



成了统一的定义。《关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见》指出，能源互联网是一种互联网与能源生产、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，具有设备智能、多能协同、信息对称、供需分散、系统扁平、交易开放等主要特征^[1]。

能源互联网是以电力系统为核心与纽带，构建多种类型能源的互联网，利用互联网思想与技术改造能源行业，实现横向多能互补、纵向“源网荷储（电源、电网、负荷、储能）”协调，能源与信息高度融合的新型能源生态系统^[9]。图 1 给出了能源互联网的“概念树”，涉及物理基础层、信息融合层、应用实践层和体制机制层等方面技术元素的融合，具体地，又包括多能互补、综合能源系统、柔性输电、虚拟电厂、分布式能源、能源+大数据、能源+区块链、能量路由器、能源+分布式交易、储能、电动汽车等概念。

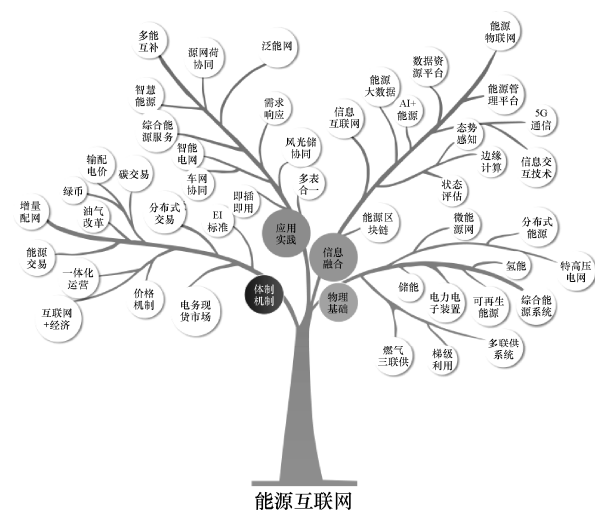


图 1 能源互联网“概念树”

2.2 各国发展现状

促进可再生能源消纳、提升整体能效、让能源更加“智慧”是世界各国追求的目标。世界各国在能源领域开展了广泛的实践探索，虽然没有直接采用“能源互联网”的概念，但这些实践探索与能源互联网在精神上是相通的。

美国、加拿大、英国、瑞士等国家侧重于“多能互补”。美国非常重视多能源集成系统相关理论和技术的研究。美国能源部于 2001 年提出了能源集成系统（integrated energy system, IES）发展计划，重点研究在保证能源系统运行可靠性的前提下，提高可再生能源占比，并加快热电联产机组等多能源集成技术及应用领域内的应用与推广^[10]。美国国家可再生能源实验室于 2008 年成立能源系统集成（Energy Systems Integration）部门，专门针对能源系统集成方面的问题展开研究^[11]。加拿大政府于 2009 年发布了题为“综合我们的能源：面向加拿大社区的集成能源系统（Combining our Energies: Integrated Energy Systems for Canadian Communities）”的研究报告，报告中深入揭示了多能源集成系统的内涵，即利用综合能源集成、智能电网等能源技术，协调可再生能源与常规能源的规划与运行^[12]。英国工程与物理科学研究协会（The United Kingdom's Engineering and Physical Science Research Council, EPSRC）于 2011 年发布了能量枢纽与网络研究项目（HubNet: Research Leadership and Networking for Energy Networks），旨在建立英国乃至欧洲的超级能源网络，提高整体能源系统可靠性以及新能源的利用率^[13]。瑞士于 2003 年启动了研究项目“未来能源网络愿景（Vision of Future Energy Networks）”，该项目最大的特色就是综合考虑各种能源形式，实现多能源系统集成，以产生协同效应^[14]。

德国、日本、韩国等国家则侧重于“信息互联”。德国联邦经济与能源部于 2008 年发起 E-Energy 创新促进计划，重点研发基于信息通信技术（ICT）的智慧能源系统，通过数字网络与信息通信提高能源供给可靠性与效率，促进可再生能源消纳^[15-16]。日本政府于 2011 年提出了国家数字电网计划（Japan's Digital Grid Scheme），其目标是把当前的大型同步电网细分成异步自主但相

互联系的微电网,借鉴互联网数字路由器和“IP地址”分配的理念,将能量路由器和能源网络基础结构作为研究重点,旨在使电网中能量的流动与互联网一样自由可控^[17]。韩国国家电力公司(KEPCO)于2017年提出了能源物联网(energy internet of things)的概念,重点研究可应用于能源领域的物联网技术、大数据、人工智能和自动化技术,建立传感器网络,从而构建一个“数字、开放、互联”的能源网络^[18]。

丹麦、欧盟等国家和组织侧重于“分布式新能源接入”。丹麦政府大力发展分布式能源,致力于高比例新能源的消纳,并试图通过电网、热网、气网和交通网的协调规划和运行,设计相应能源市场机制充分调动需求侧响应资源^[19]。欧盟于2008年发布了欧盟气候能源计划(European Union Climate and Energy Package),强调新能源消纳,例如“20-20-20”计划致力于在2020年前将欧盟的温室气体排放量与1990年的水平相比至少减少20%,确保欧盟20%的能源消耗来自可再生能源以及初级能源的使用减少20%^[15]。

3 能源互联网发展指标体系

能源战略是重要的国家战略,世界各国均开展了能源互联网的实践与探索,从国家层面设计能够量化能源互联网发展的指标体系。

3.1 能源互联网分级指标体系

能源互联网的发展既要有政府的政策支持,又要有企业的建设与参与,还要有学术研究与创新的支撑,也应该是“产—学—研”一体化打通的。所以将从政策、产业、技术、创新、建设、公众生态6个方面,全方位评估我国能源互联网发展态势,由此构建国家能源互联网发展的一级指标。在此基础上,可以从政策、产业、技术、创新、建设、公众生态6个方面分别进一步构建相应的二级指标,见表1。

表1 国家能源互联网发展指标体系

一级指标	二级指标
能源互联网政策发展	能源互联网国家政府文件数量
	能源互联网标准数量
能源互联网公众生态	能源互联网社会组织
	能源互联网搜索热度
	能源互联网新闻报道
	能源互联网搜索词频
能源互联网产业发展	能源互联网相关企业数量
	能源互联网金融投资金额
能源互联网建设发展	能源互联网基础设施建设
	能源互联网示范项目
能源互联网技术发展	能源互联网技术体系
	能源互联网典型技术
能源互联网创新发展	能源互联网研究机构数量
	能源互联网论文发表数量
	能源互联网专著出版数量
	能源互联网人才培养数量
	能源互联网专利数量

3.2 指标体系构建原则与测算方法

在设计国家能源互联网发展指标体系过程中,遵循了以下5个方面的选择。

(1) 定量指标与定性指标结合

能源互联网涉及面广,有些发展态势能够量化描述,例如智能电表安装量,可以是一个简单的数;而有些发展态势只能通过定性的方式描述,例如智能用电大数据分析技术,用简单的数据量大小等描述过于片面,它涉及用电大数据应用各个方面,只能定性分析。

(2) 全局指标与局部指标结合

描述全国能源互联网的发展有时候可以通过全国(全局)数据描述,例如全国能源互联网企业数量;但有些指标仅有某些地区具备,例如需求响应的容量,目前仅在我国江苏、上海、北京等地区有所实施。

(3) 指标应具有可获取性

能源互联网发展所涉及的各项指标应该是可获取的,虽然有些指标能够很好地反映能源互联



网发展,例如全国多能源系统的规模等,但这种指标很难准确地获取,有时候需要利用一些其他指标进行描述,例如氢产能和加氢站数量,从另一个层面进行描述。

(4) 指标应具有可复现性

为了客观准确地评价能源互联网发展情况,所有的指标应该通过同样的方式采集从而获取同样的结果,而不是不同的人利用同样的搜索手段获取不同的结果,“不同数据打架”的现象需要避免。

(5) 指标应具有可追踪性

能源互联网的发展不是一个时间断面,只有指标在不同时期的变化趋势才能体现其发展态势,所以所有的指标应该具有可追踪性,比如过一年或者若干年仍然可以利用相同的指标测算能源互联网的发展态势。

表1给出了能源互联网发展二级指标,在二级指标基础上还可能衍生出三级指标,涉及政策、产业、技术、创新、建设、公众生态各个方面,所以指标的测算方式不是单一的,主要通过以下3种途径开展。

(1) 文献检索分析

通过中国知网、Web of Science 等数据库进行参考文献检索,比如能源互联网创新发展涉及的论文发表、人才培养等可通过文献检索得到。

(2) 官方网站检索

通过对国务院、能源局、各地方经济与信息化委员会等官方网站的公开信息进行爬取,可以获取国家和地区不同部门发布的政策法规文件。

(3) 权威文件查阅

衡量能源互联网发展部分数据有时候需要参考其他权威文件,例如储能技术发展、智能家居产业可以参考权威的储能、智能家居相关的白皮书。

4 能源互联网政策发展与公众生态

4.1 能源互联网政策发展

4.1.1 能源互联网国家政府文件

在2014—2018年这5年间,包括国际条约、

宏观战略、法律法规、行业标准、部门规章及规范性文件5部分的中国能源互联网政策体系已初步建立,共发布296项政策法规,其中以国务院、国家部委等发布的部门规章及规范性文件为调整能源互联网的主要抓手,2016年与2017年是国家政策发布最频繁的年份,表明了国家对此领域的重视程度逐渐增加。国务院、国家发改委、工信部、生态环境部、财政部、国家能源局等政府机构发布的文件涉及顶层设计、“源—网—荷—储”政策、信息政策、体制改革等各个领域,其中宏观战略类政策(181项)最多,体制改革政策(86项)居第二位,表明了国家政策文件对宏观战略及能源体制改革最为重视。

图2给出了2014—2018年国家政策文件的主要分类情况,包括指导意见、新能源汽车、价格政策、管理办法、试点示范、产业规划、电网、行动计划、天然气、风电、增量配电和电化学储能各个方面。

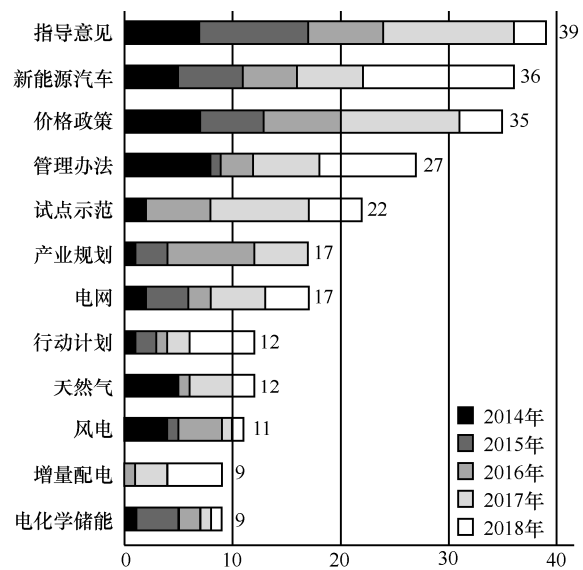


图2 2014—2018年国家政策文件分类

4.1.2 能源互联网标准制定

除了国家政策制定,行业企业相关标准也在制定中。为了贯彻落实国家关于能源互联网工作的指示精神,推动能源互联网建设,国家标准化

管理委员会于2016年对“能源互联网”领域拟立项的国家标准项目公开征求意见,中国电力企业联合会于2017年提出“中国电力企业联合会标准专项计划”。拟立项的能源互联网标准内容包括能源互联网的术语、关键设备、管理平台、信息互联以及区域能源互联网、微能源互联网的规划、设计、验收评价等领域,基本覆盖了能源互联网建设的方方面面。

截至2018年年底,能源互联网标准共计申报23项,国家标准9项,团体标准14项。其中,团体标准T/CEC 101.1-2016《能源互联网 第1部分:总则》已公布,《能源互联网 第2部分:术语》《能源互联网 第4部分:用例》2项国家标准和《区域能源互联网技术导则》《能源互联网 能源利用与转换效率评价》《能源互联网 第7-1部分:信息交换》等13项中电联(中国电力企业联合会)标准已于2018年10月23日进入征求意见阶段。

4.2 能源互联网公众生态

在国家政策的引领下,能源互联网受到广泛的工作关注,包括社会组织的成立、网络搜索的热度、新闻的广泛报道等。

4.2.1 能源互联网社会组织

中国开放共享的能源互联网生态体系逐步构建,产业升级带动效应明显,能源互联网相关社会组织不断涌现,组成有机的生态系统。截至2018年年底,中国登记备案的拥有独立法人资质的“能

源互联网”相关社会团体为1343个,按照行业或关键词的分布如图3所示。

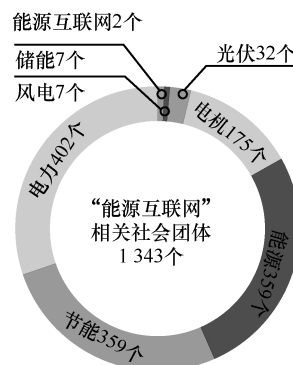


图3 能源互联网相关社会团体分布情况

4.2.2 能源互联网搜索热度

除了社会团体的相继成立,公众对能源互联网的关注意度还能通过百度搜索指数侧面反映。图4给出了能源互联网百度指数变化情况,可以看到能源互联网的公众关注度于2015年快速上升,表明此时能源互联网作为一个新理念,开始进入公众视线。此后,能源互联网公众关注度保持稳定。

4.2.3 能源互联网新闻报道

新闻媒体也开始对能源互联网进行报道,人民网、中国新闻网和百度新闻对能源互联网的报道数量如图5所示。2015年是能源互联网新闻爆发的一年,不同网络媒体新闻报道量均有较大增长。值得一提的是,2018年12月,百度新闻报道能源互

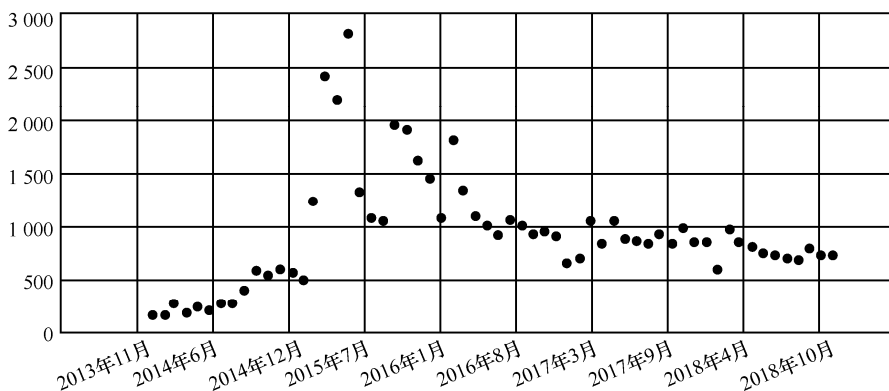


图4 能源互联网百度指数变化情况

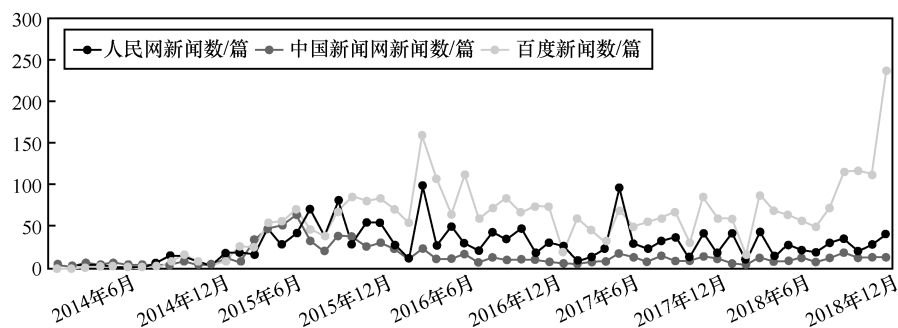


图5 能源互联网新闻报道量

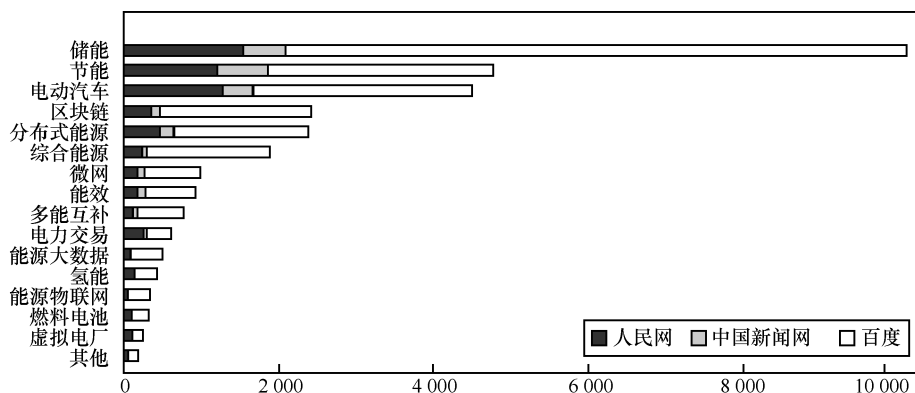


图6 能源互联网新闻报道词频

联网新闻数激增，达到单月约 250 篇的数量。

4.2.4 能源互联网搜索词频

对这些新闻报道内容进一步做词频统计，反映对能源互联网不同方面的关注程度。2014—2018 年的词频统计数据显示，能源互联网相关词汇中，排名前三的依次是储能、节能和电动汽车，如图 6 所示。

5 能源互联网产业发展与建设发展

5.1 能源互联网产业发展

5.1.1 能源互联网相关企业数量

能源互联网行业中的一些代表性企业已经通过具体行动，向外传递了能源产业转型启动的信号，趋势逐渐明显。尽管传统能源生产和输配企业仍然主导着当前的市场格局，但传统能源市场的稳定格局已出现松动迹象，部分业务边界开始变得模糊，跨界业务和企业逐渐浮现。图 7 给出了近 5 年能源互联网企业数量的变化趋势，具有明显的上升

趋势。传统能源生产企业寻求拓展业务，从生产单一能源向供应多种能源转变；从提供化石来源能源向提供清洁可再生能源转变；从能源产生企业向能源服务企业转变；从单一类型能源服务企业向多功能的综合能源服务企业转变。跨界成为传统能源企业不约而同的选择，不同的是各自的跨界方式和领域。新能源以及非能源企业也通过“互联网+”通道向能源服务领域进军。

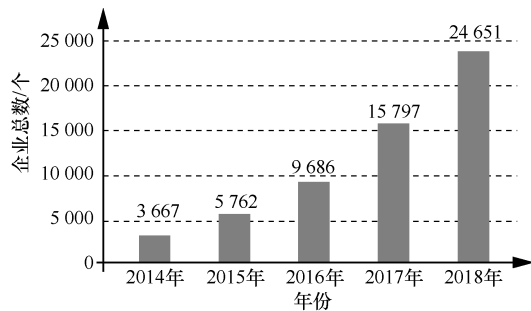


图7 能源互联网企业数量

在传统发电行业，发电行业不断提高新能源装机和新能源发电比例，开发氢能业务，并向电

力终端市场渗透。电力市场政策的进一步放开,使得发电企业与大用户更加直接面对面,并在电改9号文发布之后纷纷成立售电公司,更靠近终端市场。

电网企业在巩固能源输配领域的核心实力的同时,国家电网公司提出转型综合能源服务商的发展目标,各省区分公司分别成立区域综合能源服务公司;建设电子商务系统——国网商城,打造国内规模最大的综合能源B2B服务平台,经营范围涵盖智能家居、新能源、电力专业三大板块共9个品类。

石油石化企业也与腾讯、阿里等互联网领军企业签署合作协议,建立长期、全面的战略合作伙伴关系,在业务开发与推广、移动支付、互联网金融、O2O业务、云服务、大数据应用等多领域探索开展合作,探索传统“能源+互联网”合作新模式。

燃气企业依托城市管网资源探索“电—热—气—冷”能源互联网业务。例如新奥集团从燃气业务出发,建设提供综合能源服务的泛能网,通过泛能站、泛能微网、区域网为全国50多个城市的城区、园区及单体用户提供服务。

新能源企业积极探索能源互联网建设中的创新商业模式。光伏生产企业从制造业向集中式光伏发电行业渗透,投资分布式发电站,建设屋顶光伏,积极参与国家“互联网+”智慧能源示范项目,开展增量配电网业务,为园区提供综合能源服务,向能源互联网服务商转型。

在汽车电动化愈加明显的趋势下,围绕车辆出行与能源网络互动,制造行业的汽车生产企业、燃机生产企业、蓄电池与燃料电池生产企业、充电桩生产企业与车辆租赁企业开拓相关服务领域,进行多元化投资与业务联合,支持电动汽车出行服务、动力电池梯次利用、V2G等新业态发展。

互联网与ICT企业,依据自身的互联网技术优势,发挥信息桥梁作用,为信息融合和复杂场景应用开发解决方案,升级完善物联网设备与系统,从信息领域垂直切入能源领域,服务能源生产、输配、利用、调节、循环各流程,实现供需的时空对接、多场域的潮流匹配,提高能源综合利用效率和系统投资回报。

5.1.2 能源互联网金融投资金额

“能源互联网”的概念掀起了股票市场的热情。随着国家《关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见》的出台和新一轮电力体制改革方案的发布,“互联网+能源”上升到国家战略层面。资本市场上关于能源互联网的概念层出不穷,甚至形成了能源互联网概念股板块。以金融界网站提出的沪深股市能源互联网概念板块为例,截至2018年12月13日,共有287支能源互联网概念股股票,总体市值达3.37万亿元。其中2016年《关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见》的出台给能源互联网市场注入了一剂强心针,截至2018年年底,上市企业募资飙升至2800亿元。

这些能源互联网概念板块上市公司主要业务集中在以下4个领域:能源互联网全产业链技术支持及系统集成,例如国电南瑞、亨通光电等;新能源及分布式能源开发运营,例如专注于风电系统解决方案的金风科技、光伏电站开发建设与管理运营企业——中节能太阳能股份有限公司等;储能系统解决方案,例如阳光电源、南都电源等;综合能源服务,例如科陆电子(科陆电子立足储能微网、充电网络和销售网络能源管理及服务平台建设)、爱康科技(探索从新能源充电桩、新能源汽车运营切入电力消费服务侧)等。

5.2 能源互联网建设发展

5.2.1 能源互联网基础设施建设

能源互联网的发展以与能源、信息、材料等



领域相关的技术和产业发展为前提。其发展建设现状广泛体现在供给侧多能联供互补水平、用户侧互联互通情况以及系统可控可观程度等多个方面。截至 2018 年，我国能源互联网建设发展关键指标见表 2。

表 2 能源互联网建设发展关键指标

项目	数量
多能互补能源基地数量/个	14
火电储热容量/MW	1 210
分布式多能联供安装容量/kW	1.613×10^7
智能电表安装量/亿只	5.98
综合能源表计安装量/万台	744
电池储能安装容量/MW	2 135
需求侧响应容量/GW	28
电动汽车保有量/万辆	261
充电桩数量/万个	28.97
智能家居普及率	0.3%
氢产能/万吨	2 100
加氢站数量/座	14
综合管廊长度/km	1 180
能量路由器安装容量/MW	14
中低压直流配网容量/MVA	125.76

多能联供设备将一次能源灵活转换为多种形式的需求能源，耦合多种能源形式，是能源互联网供给侧的枢纽。目前广泛应用的设备包括热电联供及冷热电联供两种。电力“十三五”规划明确提出了“十三五”期间，热电联产机组规模达到 1.33 亿 kW 的具体要求。分布式气电方面，要求重点发展热电冷多联供，规划 2020 年投产热电冷多联供 1 500 万 kW，目前已安装分布式多能联供设备 1 613 万 kW。此后全国各省市投资建设了众多的多能联供项目，目前已投建多能互补能源基地 14 个。储能

产业蓬勃发展，根据国家“十三五”规划，截至 2017 年年底，我国已投运储能项目累计装机 28.9 GW，抽水蓄能的装机规模所占比接近 99%。电化学储能的累计装机规模位列第二，为 389.8 MW。

信息互联网技术与综合能源服务在用户侧深度交融，极大地改变了行业的运营方式与用户生活。智能电表是智能电网与能源互联网的智能终端，代表着未来能源服务差异化个性化发展方向。目前国家电网的智能电表需求量已逐步趋于饱和，南方电网公司全网智能电表覆盖率及低压集抄（即低压用户集中抄表系统）覆盖率均为 100%，提前完成智能电表和低压集抄全覆盖。作为物联网的一部分，同时也是新能源产业的重要分支，我国的电动汽车行业在过去数年高速发展。2018 年 1—7 月，中国新能源乘用车销量为 44.5 万辆，同比增幅 108%；截至 2018 年，我国电动汽车保有量 269.7 万辆，充电桩数量 28.97 万个。

用户侧表计等测量设备的普及以及智能家居的应用使得需求侧的可控性以及可观性不断提高，为需求侧的响应提供了基本技术条件。2015 年 8 月 12 日，北京市实施了首次全市范围的电力需求响应工作，组织了 17 家负荷集成商、74 家用户参与，实际削减电力负荷约 7 万 kW。江苏省需求响应发展在全国范围内较为领先。2016 年，江苏省首次进行了全省范围的电力需求响应，参与用户达到 3 154 户，实际减少负荷 352 万 kW。

5.2.2 能源互联网示范项目

2014—2018 年，为扶持、推动中国能源互联网产业发展，国家相关政府部门、机构陆续出台一系列试点示范项目，包括新能源微电网示范项目、增量配电网示范项目、多能互补集成优化示范工程、“互联网+”智慧能源示范项目等，总体情况统计见表 3。

表3 能源互联网示范项目

发布时间	项目类型	数量
2015年7月13日	新能源微网示范项目	23
2016年6月16日	储能示范项目	3
2016年9月13日	太阳能热发电示范项目	20
2016年12月1日	增量配电网第一批	105
2017年1月25日	多能互补集成优化示范工程	23
2017年5月5日	新能源微电网示范项目	28
2017年6月28日	“互联网+”智慧能源示范项目	55
2017年8月31日	风电平价上网示范项目	13
2017年10月31日	工信部关于公布2017年智能制造试点示范项目	9
2017年11月21日	增量配电网第二批示范项目	89
2018年1月19日	“百个城镇”清洁供热示范项目 136个示范项目涉及20个省	136
2018年6月25日	第三批增量配电业务改革试点	28

其中,2017年6月28日,《国家能源局关于公布首批“互联网+”智慧能源(能源互联网)示范项目的通知》发布,一共55个示范项目可分为9种类型,分别是:城市能源互联网综合示范项目,主要围绕城市核心区或城市地标性建设为核心开展;园区能源互联网,主要围绕城市高密度负荷聚集的各类园区开展;跨地区多能协同示范,以实现跨区域能源互补互济为目标开展;基于电动汽车的能源互联网示范,主要围绕城市交通及周边高速公路的构建绿色交通体系;基于灵活性资源的能源互联网示范,旨在提高“源—网—荷—储”各环节的灵活可调能力,聚焦于负荷侧需求响应实施;基于绿色能源灵活交易的能源互联网示范,主要围绕绿色能源交易平台与交易机制的构建;基于行业融合的能源互联网示范,主要围绕地区用能大户的能源梯级利用及以能源互联网为基础的行业运营模式创新展开;能源大数据与第三方服务示范,基于通信基础设施和平台建设开展多类型能源服务;智能化能源基础设施示范,以能源生产消费各个环节的基础设施智能化水平提升为目标。

6 能源互联网技术发展与创新

6.1 能源互联网技术发展

6.1.1 能源互联网技术体系

能源互联网的技术成熟度直接体现能源互联网的发展程度。结合能源互联网的体系与环节,可以形成相应的能源互联网技术体系。纵向层面,分为多能融合能源网络技术、信息物理能源系统技术、创新能源运行技术;横向层面,分为能源生产与转换技术、能源传输技术、能源消费技术、能源存储技术。

6.1.2 能源互联网典型技术

以多能集成技术为例,随着能源互联网概念的提出与发展,多能源系统的相关研究日益增加,涵盖了建模、规划、运行、评估、市场等多个方面。当前,多能源集成技术已逐步从理论研究走向实际应用,市场上已经出现多能源集成运行规划、决策评估、市场模拟的相关软件解决方案,服务于多能源系统建设和发展。

又如电力大数据技术,目前我国对传感器以及通信系统的建设进一步加速,在此基础上开展了智能配用电大数据、透明电网、电力仿真大数据等相关的研究,涵盖了数据驱动的电力用户行为模型构建、多时空尺度的负荷与可再生能源预测、基于仿真大数据的电力系统稳定性分析、高比例可再生能源电力系统运行状态表征、数据驱动的潮流方程线性化与建模、数据驱动的发电机建模与综合负荷建模、实时在线设备运行状态监测与诊断等各方面。

再如电力市场与交易平台技术,中长期交易已全面推开,中长期电力交易日趋成熟;同时开展了8个电力现货交易试点,电力市场体系逐渐完善。2018年,电力市场支撑的交易电量(含发电权交易电量)达到了20654亿kW·h,同比增长26.5%,交易电量占到社会用电总量的30.2%。



6.2 能源互联网创新发展

6.2.1 能源互联网研究机构数量

能源互联网研究机构数量是反映能源互联网创新性研究的重要指标。截至 2018 年年底，能源互联网相关研究机构共计 3 118 家，2014—2018 年保持了强劲的增长趋势，如图 8 所示。从区域上看，在北京市的研究机构有 726 家，居全国首位，东南沿海的广东省和江苏省以 393 家和 353 家分别位居第二、第三位。

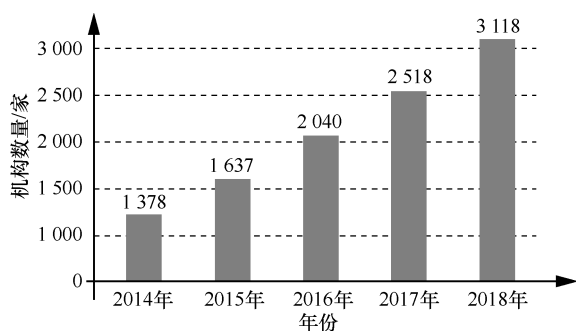


图 8 能源互联网研究机构数量

6.2.2 能源互联网论文发表数量

近 5 年，与能源互联网相关的论文在 SCI 索引、EI 索引和中国知网的数量如图 9 所示。可以看出，与能源互联网相关的论文数量近 5 年呈递增趋势。SCI 索引、EI 索引和中国知网 3 种检索方式的论文数量从 2014 年的 100 篇上下，增加到 2018 年的 600 篇以上，可以看出这一主题受到了国内外学者的广泛关注和研究。

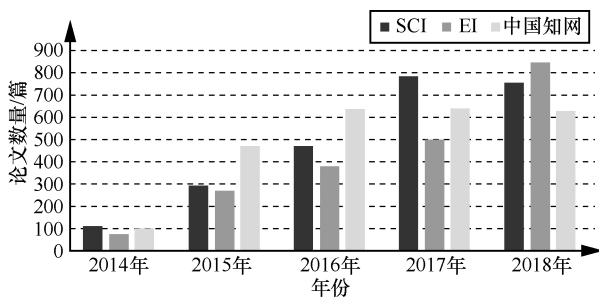


图 9 能源互联网论文发表数量

可以将能源互联网相关的研究内容分为 6 个方面：多能源系统/综合能源系统、虚拟电厂、能

量路由器、“能源+大数据”、“能源+区块链”、“能源+分布式交易”。在 SCI 索引和 EI 索引中，“能源+大数据”这一研究内容占比最高，均超过一半；在中国知网中，多能源系统/综合能源系统这一研究内容占比最高。可以看出，国际学者更加关注“能源+大数据”方向，而国内学者相对更加关注多能源系统/综合能源系统方向。而在这 3 种检索方式中，排名前三的研究内容均为“能源+大数据”、多能源系统/综合能源系统、虚拟电厂，这体现了近 5 年国内外学者的重点关注方向。学者对于“能源+区块链”和“能源+分布式交易”这两个研究方向的关注相对较弱。

6.2.3 能源互联网专著出版数量

能源互联网领域的专著数量逐年增加，2014—2018 年能源互联网领域的专著数量如图 10 所示。仍然按照相关文献发表部分中的 6 个字内容分类，其中仅有综合能源系统、虚拟电厂、“能源+大数据”3 个方向有专著。另外，一些专著的内容不属于某个子内容，因此被列入能源互联网这一门类。可以看出，从 2014 年的 0 部到 2018 年的 13 部，近 5 年专著的数量呈现井喷式增加。

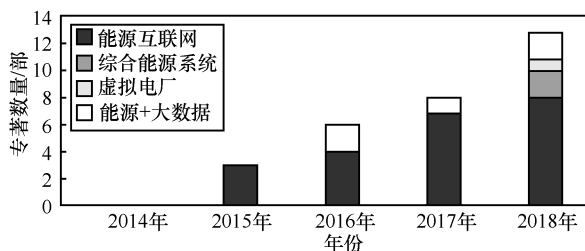


图 10 能源互联网专著出版数量

6.2.4 能源互联网人才培养数量

人才的培养对于一个学科领域的发展至关重要。能源互联网研究生毕业数量近 5 年总体上呈上升趋势，从 2014 年全国仅有 34 名，到 2017 年全国 128 名，由于 2018 年的数据尚未统计完整，因此仍然是 2017 年的毕业生数量最多。其中 2016 年出现了较为明显的增长，可以推断在 2013—2014 年，有较多的研究生选择了能源互联

网方向。

同样将能源互联网相关的研究内容分为6个方面:多能源系统/综合能源系统、虚拟电厂、能量路由器、“能源+大数据”、“能源+区块链”、“能源+分布式交易”。可以看出一半以上的毕业生的研究主题为多能源系统/综合能源系统(58%),其次的研究主题为能源+大数据(22%)和虚拟电厂(16%)。研究生研究方向排名前三的内容与发表论文数量排名前三的内容一致,尤其是和中国知网发表论文数量的排名一致。值得注意的是,在“能源+大数据”领域,毕业生数量虽然排名仅占22%,但是SCI论文数量占比60%,EI论文数量占比58%,中国知网论文数量占比31%,论文成果产出占比相对于人才培养占比而言比较显著。

6.2.5 能源互联网专利数量

从2014年到2018年,能源互联网方向专利申请数量逐年上升,且尚没有减慢趋势,从2014年仅申请14项专利,到2018年申请299项专利。从专利指标来看,反映了近5年业界对于能源互联网知识产权的重视程度逐年提升。

7 结束语

本文从政策、产业、技术、创新、建设、公众生态6个方面构建了全面反映国家能源互联网发展的指标体系,并通过文献调研、资料查阅等各种手段获取近5年的指标,并进行了深入的分析。可以看到,我国能源互联网近几年的发展有很好的政策支持,相关的行业和企业标准也有所进展,受到了广泛的公众关注;另外我国与能源互联网相关的产业蓬勃发展,体现在企业数量和金融融资的增加,与此同时,智能电表、多表合一、电制氢等基础设施建设也有长足发展;与能源互联网相关的技术,如综合能源集成技术、能源大数据技术、电力市场技术等“全面开花”,相应的论文发表、人才培养等“欣欣向荣”。希

望本文的研究能够为国家能源互联网战略性发展提供支撑。

参考文献:

- [1] 国家发展和改革委员会,工业和信息化部,国家能源局.关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见:发改能源[2016]392号[R].2016.
National Development and Reform Commission, Ministry of Industry and Information Technology, National Energy Administration. Guidance on promoting intelligent energy development of “Internet+”: FGNY(2016) No. 392[R]. 2016.
- [2] 辛禾.城市绿色电力指标体系与评价模型[D].北京:华北电力大学,2016.
XIN H. Urban green power index system and evaluation model[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [3] 蒋菱,袁月,王峥,等.智能电网创新示范区能源互联网评估指标及评价方法[J].电力系统及其自动化学报,2016,28(1):39-45.
JIANG L, YUAN Y, WANG Z, et al. Evaluation index system and comprehensive evaluation method of energy internet in innovative demonstration area of smart grid[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(1): 39-45.
- [4] 杨苹,陈滢,张经纬,等.园区能源互联网能效评估指标体系研究[J].科技创新导报,2017,14(25):157-160.
YANG P, CHEN Y, ZHANG J W, et al. The research on energy efficiency evaluation index system for industrial part energy internet[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2017, 14(25): 157-160.
- [5] 李小鹏,李存斌,计丽妍.基于粗糙集和因子分析的能源互联网发展指数体系构建[J].科技管理研究,2018,38(20):75-83.
LI X P, LI C B, JI L Y. Construction of energy internet development index system based on rough set and factor analysis[J]. Science and Technology Management Research, 2018, 38(20): 75-83.
- [6] 赵军,王妍,王丹,等.能源互联网研究进展:定义、指标与研究方法[J].电力系统及其自动化学报,2018,30(10):1-14.
ZHAO J, WANG Y, WANG D, et al. Research progress in energy internet: definition, indicator and research method[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(10): 1-14.
- [7] 马君华,陆一鸣,袁文广,等.能源互联网评价体系研究[J].中国电力,2018,51(8):38-42.
MA J H, LU Y M, YUAN W G, et al. Study on the evaluation framework of the energy internet[J]. Electric Power, 2018, 51(8): 38-42.
- [8] 李顺昕,高峰,张靖,等.城市能源战略发展指标评价体系研究[J].中国工程科学,2018,20(3):117-124.
LI S X, GAO F, ZHANG J, et al. Study on urban energy strategy development index evaluation system[J]. China Engineering



- Science, 2018, 20(3): 117-124.
- [9] 能源互联网研究课题组. 能源互联网发展研究[M]. 北京: 清华大学出版社, 2017.
- Energy Internet Research Group. Research on the development of energy internet[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2017.
- [10] QUELHAS A, GIL E, MCCALLEY J D, et al. A multiperiod generalized network flow model of the U.S. integrated energy system: part I: model description[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(2): 829-836.
- [11] 王毅, 张宁, 康重庆, 等. 能源互联网中能量枢纽的优化规划与运行研究综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(22): 5669-5681.
- WANG Y, ZHANG N, KANG C Q, et al. Review and prospect of optimal planning and operation of energy hub in energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(22): 5669-5681.
- [12] Government of Canada. Combining our energies: integrated energy systems for Canadian communities [EB]. 2009.
- [13] Engineering and Physical Sciences Research Council. HubNet: research leadership and networking for energy networks [EB]. 2011.
- [14] GEIDL M. Integrated modeling and optimization of multi-carrier energy systems[D]. Zürich: Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2007.
- [15] 吴建中. 欧洲综合能源系统发展的驱动与现状[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(5): 1-7.
- WU J Z. Drivers and state-of-the-art of integrated energy systems in Europe[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(5): 1-7.
- [16] 杨思维. 升级版德国“工业 4.0 平台”经验对我国制造业的影响[J]. 电信科学, 2016, 32(1): 108-111.
- YANG S W. Impact of the upgraded version of German “industrial 4 platform” on China’s manufacturing industry[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(1): 108-111.
- [17] ABE R, TAOKA H, MCQUILKIN D. Digital grid: communicative electrical grids of the future[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(2): 399-410.
- [18] KU T Y, PARK W K, CHOI H. IoT energy management platform for microgrid[C]//2017 IEEE 7th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES), Nov 1-3, 2017, Toronto, Canada. Piscataway: IEEE Press, 2017: 106-110.
- [19] 尤石, 宋鹏翔. 丹麦区域能源互联网发展综述[J]. 供用电, 2017, 34(12): 2-7.
- YOU S, SONG P X. A review if development of integrated district energy system in Denmark[J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(12): 2-7.

[作者简介]



康重庆 (1969—), 男, 博士, 清华大学能源互联网创新研究院院长, 清华四川能源互联网研究院院长、教授, 主要研究方向为能源互联网的理论与技术。

王毅 (1992—), 男, 博士, 清华大学能源互联网创新研究院在站博士后, 主要研究方向为综合能源系统、用电大数据、无线通信网与电力网耦合。

张靖 (1971—), 女, 清华大学能源互联网创新研究院高级工程师, 主要研究方向为能源战略。

王永真 (1988—), 男, 博士, 清华大学能源互联网创新研究院在站博士后, 主要研究方向为综合能源系统多目标优化。

高峰 (1977—), 男, 博士, 清华大学能源互联网创新研究院副院长、高级工程师, 主要研究方向为能源战略。

刘毅 (1980—), 男, 清华四川能源互联网研究院副院长, 主要研究方向为能源互联网技术。