

能源互联网: 驱动力、评述与展望

孙宏斌¹, 郭庆来¹, 潘昭光¹, 王剑辉²

(1. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学电机系), 北京市海淀区 100084;

2. 阿贡国家实验室, 美国阿贡 IL 60439)

Energy Internet: Driving Force, Review and Outlook

SUN Hongbin¹, GUO Qinglai¹, PAN Zhaoguang¹, WANG Jianhui²

(1. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments
(Department of Electrical Engineering, Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China;
2. Argonne National Laboratory, Argonne IL 60439, USA)

ABSTRACT:Energy internet, the results of integration of the energy system and the internet, is the focus and innovation cutting edge of the contemporary international academic and industrial area. It will have disruptive effects on the traditional energy system and the energy industry. The driving force for the raise and development of energy internet is analyzed from environmental, economic, social, technical and policy aspects. This paper surveys the domestic and international development of energy internet, and reviews a variety of energy internet concepts. These concepts emphasize global electric energy interconnection, or multi-energy coupling or energy information integration respectively, and have a gap from the ideal energy internet. This paper regards energy internet as the results of integration of the energy system and the internet, inclusive existing concepts but with more profound contents. The key idea of energy internet is openness and the key feature is the deep integration of the internet ideas and technologies. The basic architecture includes “internet-like energy system” and “internet+”. Several basic science problems of energy internet in the system level are proposed. The development of energy internet will effectively promote the energy market, efficiency and greenization, and make the large traditional energy industry a fertile ground for people’s innovation and entrepreneurship.

KEY WORDS:energy internet; internet+; CPS

摘要:能源互联网是能源和互联网深度融合的结果,是当前国内外学术界和产业界的关注焦点和创新前沿,可能颠覆传

统的能源行业。剖析了能源互联网提出和发展的驱动力,包括环境、经济、社会、技术和政策等方面。梳理了国内外能源互联网的发展历程,评述了所提出的不同的能源互联网概念,这些概念分别侧重全球电力互联、侧重多种能源耦合和侧重能源信息融合。认为能源互联网是能源网和互联网深度融合的产物,能够包容现有的概念,但具有更深刻的内涵。其中,开放是其核心理念,互联网理念和技术深度融入是其核心特征,能源系统的类互联网化和互联网+是其基本架构。提出了能源互联网系统层面若干基础科学问题。能源互联网的发展将有力促进能源的市场化、高效化和绿色化,并使能源这一庞大的传统行业成为万众创新创业的沃土。

关键词:能源互联网; 互联网+; 信息物理系统

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2015.11.001

0 引言

能源是社会经济运行的动力和基础。每一次工业革命都离不开能源类型和使用方式的革新^[1],其推动着人类社会的发展和进步。近几年,以可再生能源、分布式发电、储能、电动汽车等为代表的新能源技术和以物联网、大数据、云计算、移动互联网等为代表的互联网技术发展迅猛,以“新能源+互联网”为代表的第三次工业革命正在世界范围内发生,成为各国新的战略竞争焦点。能源互联网是能源和互联网深度融合的结果,是第三次工业革命的核心之一,也是当前国际学术界和产业界科技创新的新前沿,是能源领域继智能电网后的又一重要发展方向。

能源互联网是基于互联网理念和技术构建的新型信息能源融合的开放系统,将改造甚至颠覆现有的能源行业,打破行业垄断,实现去中心化,使能源这一庞大的传统行业成为创新创业的沃土,可以大幅提高能源使用效率,促进可再生能源的大规

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973 计划)(2013CB228202); 国家自然科学基金项目(51537006); 国家自然科学基金委创新研究群体项目(51321005)。

Project Supported by the National Basic Research Program of China (973 Program)(2013CB228202); National Natural Science Foundation of China(NSFC)(51537006); the Foundation for Innovative Research Groups of the National Natural Science Foundation of China(51321005).

模发展。

作为具有重大影响的新生事物，能源互联网的概念还在讨论和发展中，呈现出“百家争鸣”的良好研讨态势。本文将重点分析能源互联网的驱动力，梳理其发展历程，评述现有的能源互联网概念，并提出能源互联网概念及架构、关键基础研究方向，展望其意义和发展潜力。

1 能源互联网的驱动力

能源互联网的提出和发展具有深刻的环境、经济、社会、技术和政策等诸多驱动力，既是能源系统自身发展的趋势，也有外部对能源系统提出的迫切需求，内因外因相结合，使之具有鲜明的时代意义和巨大的发展空间。

1.1 环境驱动力

环境问题已经成为制约人类可持续发展的世界性难题，也是我国发展面临的重要挑战。2014年全国平均霾日17.9天，京津冀和长三角地区分别达到61天和66天^[2]，占了全年将近1/5的天数。为了应对环境挑战，我国已经承诺2030年左右CO₂排放达到峰值^[3]，多项研究也给出了我国2050年可再生能源发电占80%以上的技术路线图^[4-5]。近几年我国可再生能源发展虽然十分迅速，但消纳问题依旧突出。据能源局统计，2015年第1季度全国风电平均弃风率18.6%，同比上升6.6%，其中吉林达到58%，弃风现象非常严重。随着可再生能源装机容量的继续增加和经济增速的放缓，可再生能源消纳变的更加迫切。而从用电侧来看，我国的能源使用效率较低，虽然我国单位GDP能耗持续下降，但仍远高于世界平均水平，2011年时仍为世界平均水平的2.5倍。为缓解环境压力，需要在现有基础上显著提高可再生能源消纳能力和能源利用效率，通过技术进步实现能源生产和消费模式革命。

1.2 经济驱动力

经过30多年的高速发展，我国经济进入新常态，面临转变经济发展方式的重要任务，需要培育新的支柱产业和新的经济增长点，促进我国产业升级。能源行业作为国民经济的传统支柱行业，对经济的发展和产业升级具有重要影响。2014年中国能源集团500强营业总收入19.58万亿元，占GDP34.43%^[6]。2015年政府工作报告提出实施新能源、燃气轮机等重大项目，把一批新兴产业培育成主导产业，支持新能源汽车等战略性新兴产业^[7]。与此同时，互联网对GDP的贡献也越来越大。根据麦肯锡研究，2013年中国互联网经济占GDP的

4.4%，超过了美国和德国。2013—2025年间，互联网将帮助中国GDP年增长4~14万亿元，相当于GDP增长总量的7%~22%^[8]，其中22%的乐观估计来自于以下假设：相应的扶持性政策框架将很快到位，各行业积极引入新的互联网应用，并打造数字产品和服务的新市场。互联网在能源行业的应用具有非常可观的空间。

1.3 社会驱动力

互联网的普及已经深刻改变了人们的观念和生活方式，也为创新创业提供了低成本和便捷的途径。截至2014年12月，我国网民总规模达6.49亿，互联网普及率达47.9%，手机网民规模达5.57亿；网络购物用户规模达到3.61亿，比例提升至55.7%；团购用户规模达到1.73亿，比例提升至21.3%；网上支付的用户规模达到3.04亿，比例提升至46.9%；网络理财产品的网民规模达到7849万，在网民中使用率为12.1%^[9]。可以预见未来人们将更加习惯并依赖于互联网实现各种功能，具有更强的个性化和用户体验需求，也具有更多的选择性。用户行为和选择的改变将倒逼能源供给和传输的变化。深入人心的互联网思维和互联网体验也正在改变能源行业，在能源市场比较发达的美国、德国等国家，许多融合互联网的新型的能源企业不断出现，比如Opower、Powershop、Johnson Controls等。在中国，新能源企业与互联网企业也开始尝试“跨界”合作，如阿里与阳光电源、中石油、中石化的合作，腾讯与四川电网的合作，绿能宝等。全新商业模式的出现将带来整个能源行业的变革。

1.4 技术驱动力

1.4.1 能源系统发展

能源系统包括电力、供热、供冷、石油、天然气、交通用能等多个子系统，其中电能由于使用方便、清洁等特点，普及率最高，电力系统的自动化水平也处于领先地位。智能电网是电力系统发展的最新阶段^[10-14]，已被很多国家包括美国、欧盟、中国、日本等视为推动经济发展和产业革命、应对气候变化、建立可持续发展社会的新基础和新动力，取得了许多重要成果。和欧美的智能电网相比，我国智能电网在市场化、需求侧等方面还存在较大差距，而互联网技术为实现真正以用户为中心提供了技术突破的可能性。

近几年新能源发展十分迅速，除了带来接入和消纳的问题外，也给行业结构带来重要影响。不同于传统能源的集中式发展模式，多种新能源适合分布式发展。分布式能源的发展将使传统的能源消费

者变为产消者,从而带来能源生产的去中心化,影响人们的生活工作习惯方式,进而影响整个能源行业的生产、传输、分配和消费方式,也将影响能源交易、融资等模式。在分布式发展迅速的地方,传统发电企业、电网企业已经明显感受到购售电量的下降。

能源领域的另一个重要发展方向是能源的综合利用,即综合能源系统^[15-16]。传统的能源子系统之间相对孤立,形成多个能源孤岛,不利于提高能效和可再生能源消纳。综合能源系统涵盖多个能源子系统,可以通过多种能源的综合管理和梯级利用,大幅提高能源的使用效率和减少碳排放,提高可再生能源的消纳能力,增强系统的可靠性和应对突发情况的能力,帮助边远地区实现能源供给。综合能源系统近年来得到了较快发展,尤其是在欧洲发展迅速。

1.4.2 互联网发展

互联网是现代信息系统发展最重要的成果之一。互联网起源于 20 世纪 60 年代的美国,经过几十年的迅速发展,已经形成了全球性的互联网络。互联网技术在不断地快速演进,从集中式走向分布式,从用户单向接收信息的 Web1.0 时代进入了用户双向互动的 Web2.0 时代,移动互联网迅速发展。近几年,随着大数据、云计算、分布式计算、人工智能等新技术不断发展,互联网也向更高层次发展,以物联网技术为代表,将人与人的互联扩展到物与物、人与物的互联。

互联网深刻影响了人类社会的各个层面,改变了人们生活和工作方式,甚至影响了人们的思维理念。互联网是目前最活跃的行业之一,新的企业和商业模式不断出现,并且正在改造和颠覆许多传统行业,比如零售、批发、广告、媒体、通信、物流、交通、餐饮、金融、教育、出版、手机等行业,创造了像阿里巴巴、腾讯、百度、小米等互联网巨头,产生了消费者对消费者(customer to customer, C2C)、消费者对企业(consumer to business, C2B)、(business to customer, B2C)、企业对企业(business to business, B2B)、线上到线下(online to offline, O2O)、大规模在线开放课程(massive open online courses, MOOC)、创客、维基、众包、众筹等新的商业模式。能源行业作为国民经济的支柱行业之一,也必将成为互联网改造和融入的对象。

1.5 政策驱动力

1.5.1 能源革命

2014 年 6 月 13 日,中央财经领导小组第六次

会议研究中国能源安全战略。习近平提出能源生产和消费革命是国家的长期战略,定调“推动能源体制革命,还原能源商品属性”,构建有效竞争的市场结构和市场体系,强调“推动能源技术革命,把能源技术及其关联产业培育成带动我国产业升级的新增长点”。2015 年 3 月 15 日通过的《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》^[17]的改革重点可以概括为“三放开、一独立、一深化、三加强”,将进一步推进我国电力市场的形成。各项配套的政策正在逐步出台和完善,我国能源革命的大幕已经拉开。

在新能源消纳方面,政府已经出台许多促进措施。2015 年 3 月 20 日发布的《国家发展改革委、国家能源局关于改善电力运行调节促进清洁能源多发满发的指导意见》^[18]鼓励清洁能源发电参与市场,鼓励清洁能源优先与用户直接交易。

在电价改革方面,大用户直供^[19-20]已经在多地开展,输配电价改革试点已经在深圳开展^[21],商业电价每 kW·h 平均降价 8.43 分。内蒙古也已经启动输配电价改革,近日安徽、湖北、宁夏、云南省(区)、贵州五省成为新的试点^[22-23]。

在需求侧管理方面 2015 年 4 月 7 日发布的《国家发展改革委、财政部关于完善电力应急机制做好电力需求侧管理城市综合试点工作的通知》^[24],提出试点城市及所在省份要加强电力需求侧管理平台建设,并要求通过手机 APP 等方式,向试点地区的用户提供其准实时用电数据,以便吸引用户参与需求响应。

1.5.2 互联网+

2015 年 3 月 5 日,李克强总理在政府工作报告^[7]中提出:“制定‘互联网+’行动计划,推动移动互联网、云计算、大数据、物联网等与现代制造业结合,促进电子商务、工业互联网和互联网金融健康发展,引导互联网企业拓展国际市场。”7 月 1 日发布的《国务院关于积极推进“互联网+”行动的指导意见》^[25]中,“互联网+”智慧能源成为重点行动,“通过互联网促进能源系统扁平化”,其目标与内容与能源互联网具有一致性,并明确提到建设能源互联网。

“互联网+”战略顺应了世界工业发展的趋势。德国提出了工业 4.0 战略,美国提出了工业互联网战略,其核心特点都是利用互联网技术大幅提升生产率,降低成本,推动经济的发展。据美国通用电气预测,未来 20 年工业互联网将再造一个美国经济。“互联网+”战略上升至国家层面,将对我国的

各行各业，尤其是工业、能源等行业的发展产生极大的推动作用。

1.5.3 创新驱动战略

2015年3月13日，《中共中央国务院关于深化体制机制改革加快实施创新驱动发展战略的若干意见》^[26]发布，创新驱动成为我国的国家战略。其目标是“使市场在资源配置中起决定性作用和更好发挥政府作用”，“营造大众创业、万众创新的政策环境和制度环境”。具体到能源领域，2014年发布的《能源发展战略行动计划(2014-2020年)》^[27]已经将创新驱动作为四大战略之一。创新驱动战略的实施，将激发全社会创新创业的热情，众筹、众创、创客等的兴起是最明显的体现。互联网降低了创新门槛，为创新提供了更多可能，具有庞大市场的能源领域将成为万众创新的沃土。

2 能源互联网发展历程

2.1 国外能源互联网发展历程

20世纪80年代Richard Buckminster Fuller提出了世界电能网络(world electrical energy grid)的构想。1986年Peter Meisen创立了全球能源网络学会(Global Energy Network Institute, GENI)。这里的互联主要是指物理网络(grid或network)的连接，还没有引入互联网理念和技术。此时互联网的发展刚刚起步，处于向能源网学习阶段。

2003年美加8·14大停电后，《The Economist》于2004年发表了《Building the Energy Internet》^[28]。该文提出要借鉴互联网自愈和即插即用的特点，建设能源互联网(energy internet)，将传统电网转变为智能、响应和自愈的数字网络，支持分布式发电和储能设备的接入，减少大停电及其影响。

2008年，美国国家科学基金资助FREEDM项目^[29]，历时5~10年，项目成立了FREEDM研究中心，提出建设能源互联网(energy internet)。同年德国联邦经济技术部与环境部发起E-Energy项目，历时4年，实施了能源互联网(internet of energy)的6个示范项目^[30]。

2011年里夫金出版《第三次工业革命》^[1]，提出能源互联网(energy internet)是第三次工业革命的核心之一，使得能源互联网被更多人关注，产生了较大影响。在此之前，里夫金就参与了欧洲部分国家的能源规划。2014年里夫金出版《零边际成本社会》^[31]，进一步阐述了能源互联网的作用。

2.2 国内能源互联网发展历程

2012年中文版《第三次工业革命》出版，国内

关于能源互联网的讨论也是从这年开始升温。2012年8月由中国科学院咨询评议工作委员会等举办，国防科技大学承办的首届中国能源互联网发展战略论坛在长沙举行，文献[32]对能源互联网概念进行了介绍和初步研究。

2013年9月18日，国家能源局委托江苏低碳研究院开展中国能源互联网发展战略研究。9月25日中国科学院学部举办“可再生能源互联网”科学与技术前沿论坛。12月5日国家电网提出未来的智能电网，是网架坚强、广泛互联、高度智能、开放互动的“能源互联网”^[33]。

2014年6月由中国宏观经济信息网等主办的智慧城市与能源互联网发展国际高峰论坛在辽宁大连举办。6月中国电科院启动了“能源互联网技术架构”方面的基础性前瞻性项目研究。7月国家电网提出建设全球能源互联网构想，并于2015年2月3日发布《全球能源互联网》^[34]一书。2014年9月东方电子在烟台举办“2014能源互联网技术论坛”。由中国工程科技发展战略研究院编著的《2015中国战略性新兴产业发展报告》将能源互联网列入中国战略性新兴产业^[35]。关于能源互联网的研究也在增加^[36-44]。

2015年1月，智慧能源国际峰会举办，主题为“开启能源互联网新时代”。4月能源局组织召开能源互联网工作会议，提出制定国家能源互联网行动计划，并成立中国能源互联网联盟。4月21—23日，由清华大学发起的香山科学会议“能源互联网：前沿科学问题与关键技术”学术讨论会在北京召开，来自25家单位的50余位能源电力、信息技术、科技管理领域的海内外专家学者参加了会议。4月24日清华大学能源互联网创新研究院揭牌，成为我国第一个能源互联网创新研究科研机构。产业界也已经开始了具体的行动，比如远景能源的“格林威治”云平台、阿里云“智慧光伏云 iSolarCloud”、华为的智能光伏电站、阳光动力的绿能宝等。

3 能源互联网概念评述

3.1 概述

能源互联网目前还没有被广泛认可的定义，不同组织提出了不同的概念和名称，各有侧重，根据其特点可以大致将现有概念分为3类，如表1所示。

1) 侧重全球电力互联，以国家电网全球能源互联网为代表，主要特点是电力网络在空间上的扩大，将不同区域电网互联，实现不同区域不同类型新能源的跨区消纳。

表 1 现有能源互联网概念分类
Tab. 1 Category of existing energy internet concepts

特点	代表
侧重全球电力互联	全球能源互联网
侧重多种能源综合	综合能源系统、泛能网
侧重能源信息融合	FREEDM、E-Energy、Digital Grid、 里夫金 Energy Internet

2) 侧重多种能源综合, 以综合能源系统和新奥泛能网为代表, 主要特点是电、热、冷、气、交通等不同能源系统之间互联, 一方面通过能源综合开发利用提高能效, 另一方面通过将电能转换为热、冷、天然气、电动汽车储能等实现可再生能源的消纳。

3) 侧重能源信息融合, 以美国 FREEDM、德国 E-Energy、日本 Digital Grid 和里夫金 Energy Internet 为代表, 主要特点是利用电力电子、信息通信和互联网等技术进行能量的控制和信息的实时共享, 实现能源共享和供需匹配, 从而消纳可再生能源。

下文对各个概念进行具体的阐述。

3.2 国网全球能源互联网

2014 年 7 月, IEEE 电力与能源协会年会在美国华盛顿特区举行, 国家电网公司董事长刘振亚提出构建全球能源互联网的构想。全球能源互联网是以特高压电网为骨干网架(通道)、以输送清洁能源为主、全球互联的坚强智能电网, 符合 2 个替代(清洁替代和电能替代)的需求。全球能源互联网由跨洲、跨国骨干网架和各国各电压等级电网构成, 连接“一极一道”(北极、赤道)等大型能源基地以及各种分布式电源, 能够将水能、风能、太阳能、海洋能等可再生能源输送到各类用户, 是服务范围广、配置能力强、安全可靠、绿色低碳的全球能源配置平台, 具有网架坚强、广泛互联、高度智能、开放互动的特征^[34]。

3.3 综合能源系统

综合能源系统^[15-16, 45]有不同名称, 包括混合能源系统、多能源系统、能源集成等, 强调多种能源的综合开发利用, 涵盖电、热、冷、气、电气化交通等多个能源系统, 可以在规划、运行中实现不同能源系统的优势互补, 有助于可再生能源的大规模接入和高效利用, 提高能效降低费用。但不同能源耦合使系统复杂性增加, 如不善管理, 系统间的耦合级联事故风险可能会增大。综合能源系统已经得到多国关注, 在欧洲发展迅速, 以北欧国家为代表的供暖、燃气和电力系统的互动日益显著^[16], 瑞士在 Energy Hub 概念的提出和应用方面走在世界

前列^[46], 英国在多类型能源系统方面取得了诸多研究成果^[47-48]。

3.4 新奥泛能网

新奥集团提出的泛能网是将信息网、能源网和物质网融合而成的智能协同网。能源的综合梯级利用是泛能网的基础, 泛能网的本质是利用“互信息”对系统的测量、控制和调制来提升整个能量系统的系统能效。新奥在廊坊兴建了能源生态城, 目标是实现能源综合利用的最优化、最大化, 包含微藻养殖、煤气化、生物燃气、三联供系统、地源热泵系统、储电、储冷热系统、CNG 储气、水处理系统、光伏发电、储冰系统、智能大厦等项目。

3.5 美国 FREEDM

FREEDM 全称为未来可再生电力能源传输与管理系统(future renewable electric energy delivery and management systems)^[49], 2008 年得到美国国家自然科学基金会资助, 研究中心设在美国北卡州立大学。FREEDM 项目提出能源互联网(energy internet)的出发点是类比于互联网将原有集中式转变为分布式, 改造电力系统实现分布式能源的接入和即插即用。FREEDM 的理念是在电力电子、高速数字通信和分布控制技术的支撑下, 建立具有智能的革命性电网构架来消纳大量分布式能源。类比于互联网, FREEDM 系统的三大特色技术为“配电系统”即“即插即用”接口、能源路由器和基于开放标准的 FREEDM 操作系统。

3.6 德国 E-Energy

E-Energy 项目于 2008 年由德国联邦经济技术部与环境部发起^[30, 50], 为期 4 年。E-Energy 的特点是信息通信技术和能源系统的融合, 通过智能监视、控制和调节电力系统, 提高电力供应的效率和环境兼容性, 确保供应安全。E-Energy 一共有六大示范项目, 分别是库克斯港 eTelligence 项目、莱茵鲁尔地区 E-DeMa 项目、卡尔斯鲁厄和斯图加特地区 Meregio 项目、莱茵—内卡城市圈“曼海姆示范城市”项目、哈茨地区 RegMod 项目和亚琛 Smart Watts 项目。六大项目各有侧重, 其主要特点是利用 ICT 技术, 建立能源市场允许各类型用户参与, 通过供需双方实时数据共享, 实现能源动态匹配和交易。

3.7 日本 Digital Grid

数字电网(digital grid)^[51]概念由 Abe 提出, 其出发点是为了减少大面积的连锁故障和实现高渗透可再生能源的消纳, 核心是将同步电网分为几个异步的子电网, 子电网之间通过数字电网路由器连

接,通过数字电网控制器直接调控潮流,使子电网内的可再生能源不会影响大电网。数字电网路由器和控制器都会被分配唯一的IP地址,使用类似于互联网的IP协议。能量的各种处理都可以被记录,包括位置、时间、发电类型、价格等。

3.8 里夫金 Energy internet

2011年,美国学者杰瑞米·里夫金在其著作《第三次工业革命》^[1]中将能源互联网(energy internet)作为第三次工业革命的核心之一,并在《零边际成本社会》^[31]中进一步阐释。和前面偏向于技术的概念不同,里夫金是从社会经济和工业革命的高度提出能源互联网概念。里夫金的能源互联网是以新能源和互联网技术为基础,可以将能源的边际成本降为零,实现能源的共享,从而构建出一个全新的能源体制和工业模式,进而形成第三次工业革命。该能源互联网有五大支柱:1)支持由化石能源向可再生能源转变;2)支持大规模分布式电源的接入,实现能源的分散式生产;3)支持大规模氢储能及其他储能设备的接入;4)利用互联网技术改造电力系统,实现能源共享;5)支持向电气化交通的转型。这五大支柱必须齐头并进,一起发展才有可能实现能源互联网的基础设施和应用基础,并以此为支撑推动第三次工业革命。

3.9 小结

必须指出,上述分类是为了突出不同概念的主要特点,实际上每个概念可能同时涉及多种特点,并且其内涵也在不断发展。全球能源互联网、综合能源系统和泛能网的运行离不开信息通信技术的运用;综合能源系统有不同层次,也包括跨国网络,比如欧洲的天然气和电力耦合网络;德国E-Energy也有项目涉及水、电、气、热等多种能源类型,里夫金也强调氢储和电动汽车。进一步分析,FREEDM、E-Energy、Digital Grid和里夫金能源互联网之间也有所区别,FREEDM更侧重一次能流的控制和配网层面,E-Energy更侧重ICT技术的应用和用户的参与实现供需平衡,Digital Grid侧重异步电网互联和IP技术应用,而里夫金则从经济社会高度强调能源共享和边际成本下降。

能源互联网是能源和互联网深度融合的产物,具有全新的思维理念、深刻的科学问题和广阔的应用空间,其内涵有待进一步挖掘和概括,这也是目前产业界和学术界关注的热点,各种不同意见与观点也不断交叉碰撞。应该说,能源互联网这个名词概念是在智能电网发展过程中提出的,虽然借鉴了互联网的部分理念,但对互联网最新的技术和理念

的应用前景缺乏深入的认识和分析。现有概念强调了不同侧面,相比理想的能源互联网概念,还存在差距。全球能源互联网、FREEDM、E-Energy和Digital Grid主要关注电力系统,对能源的综合利用强调不足。综合能源系统、泛能网强调了不同能源间的相互转化和互补,但对大量用户和各种参与者加入的能源市场和创新创业关注不足。里夫金的概念则偏于宏观层面,对具体的关键科学技术和实现方法缺乏深入理解。此外互联网强调以用户为中心,相关技术的引入有更深刻的意义和超越能源本身的影响,涉及技术、商业、金融、社会等各层面,可能颠覆能源传统的生产、传输、消费方式,影响人们的生活工作方式。

4 展望

4.1 能源互联网的新内涵

能源互联网应当包容现有的不同能源互联网概念和智能电网等概念,但具有更深刻的内涵。

开放是能源互联网最核心理念。因为开放而互联,互联产生价值,而创造新的价值是能源互联网的本质。和现有概念相比,能源互联网需要更加开放,实现更广大的互联,创造更多的价值:开放不同能源类型,实现多能源互联,提升能效和新能源比例;开放不同参与者,实现大量用户和参与者的进入,促进能源共享交易和创新创业;开放标准和接口,实现丰富应用的开发,形成能源互联网生态圈。

能源互联网以互联网理念和技术的深度融入为核心特征,能够支撑多类型能源的开放互联,支撑能量自由传输和用户的广泛深度参与的自由多边架构,支撑众筹众创的能源互联网市场和金融,支撑高渗透可再生能源的接入和消纳,支撑能源运行、维护、交易、金融等大数据分析,具有集中分布的多层级自组织网络架构等。

4.2 两个层面互联问题

在技术形态上,能源互联网比智能电网有更多更开放的互联,主要解决以下2个层面的互联问题:

4.2.1 物理互联问题

当前能源系统中,有些能源尚未互联,表现为:冷/热/电/气/交通等能源子系统相互割裂,综合能效低。能源互联网要实现多能互联,构建多能流系统。

有些能源尚未联好,表现为:可再生能源存在弃风/光/水问题;分布式发电和微网,源及含源系统的即插即用问题尚未很好解决;电、热、冷等能量的传输和转换效率有待提高;用能不便捷,如能

源 WiFi 尚不成熟;等等。能源互联网要解决以上问题,使能源的生产、转换、传输、使用更加绿色、高效、便捷、可靠。

4.2.2 数据互联问题

只有物理互联是无法成为能源互联网的。实现供需对接,盘活和优化资源靠的是数据互联,即通过互联网,实现能源资源的数据化和透明化,并将数据开放给生产者,实现数据共享,如能源 Uber,盘活闲置的能源资源。

4.3 能源互联网的两层架构

互联网快速发展的背后是互联网理念以及相应的支撑技术。能源互联网以互联网理念和技术为基础,实现能源系统的快速发展。能源互联网的架构如图 1 所示,分为 2 层。

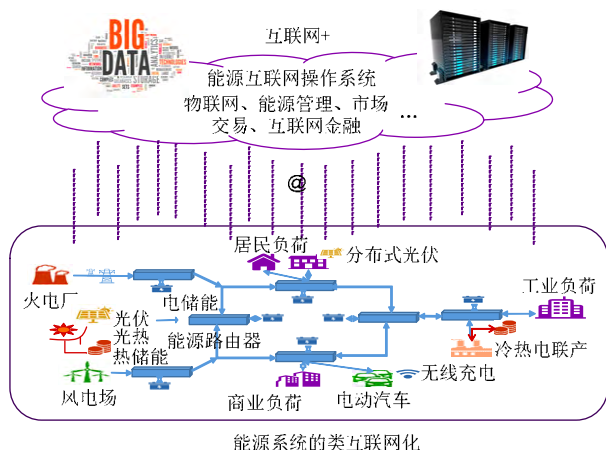


图 1 能源互联网的 2 层架构

Fig. 1 Two-level architecture of energy internet

第 1 层是能源系统的类互联网化,表现为互联网理念对现有能源系统的改造,包括多能源开放互联、能量自由传输和开放对等接入,主要解决物理层面的互联问题。多能源开放互联打破现有电、热、冷、气、油、交通等能源子系统相对封闭的现状,实现多能源互补,可以提高能源使用效率和可再生能源消纳能力。能量自由传输表现为远距离低损耗(零损耗)大容量传输、双向传输、端对端传输、选择路径传输(能源路由)、无线能量传输(能源 WiFi)等,从而可以更灵活地控制能量流动,实现源荷互动和能量优化传输,提高系统可靠性和稳定性。开放对等接入允许各种主动负荷(包括需求响应、分布式能源、电动汽车等)的即插即用,实现设备和系统的自动感知、识别和管理。

第 2 层是互联网+,即互联网理念和技术在能源系统的融入,包括能源物联、能源管理和能源互联网市场,主要解决数据互联问题。互联网+将形成能源互联网操作系统,有效管理能源互联网的各

种资源,并提供开放接口支撑能源互联网丰富的应用。互联网为能源的运行、维护、交易和金融等提供开放的平台,支撑大量生产者的参与和对接。物联网、大数据、云计算、移动互联网等技术可以显著提高能源系统的感知、管理和运行水平,为用户提供更加专业、便捷、个性化的服务,保障能源互联网的可靠、高效、绿色和便捷。用互联网理念改造传统能源行业,实现能源行业去中心化,建设开放的能源市场,降低成本,促进能源领域的万众创新创业,产生新的商业模式和新业态,形成能源互联网生态圈。

4.4 能源互联网系统层面的基础科学问题

能源互联网的发展有赖于若干关键基础科学问题和关键技术的突破,其中系统层面具有突破性的关键基础科学问题列举如下:

4.4.1 能量信息学基础理论

揭示能量流与信息流的相互作用机理,提出基于能量信息学的类互联网能源网络架构,研究基于信息论与数据科学的能源网络优化决策理论与方法,为能源互联网提供理论基础。

4.4.2 类互联网能源网络自组织理论与技术

研究含信息属性的能源路由器、信息模型的分布式自动生成与自组织等技术,实现即插即用的能源网络,支撑高比例分布式可再生能源的对等接入和能量的开放互联与共享。

4.4.3 集中协同-分布自治的能量管理理论和技术

将现有的集中式能量调度与管理体系变革为集中协同-分布自治的新模式,通过开放与对等的多能流能量管理技术实现多种能源形式的互联与共享,研制多能流能量管理系统及家族,提高分布式可再生能源利用率与系统整体能效。

4.4.4 信息-能量耦合系统的安全稳定性理论

通过信息-能量耦合的统一建模,提出信息流与能量流混成计算与量化分析技术、联合安全评估技术等,构建信息-能量耦合系统的动力学模型与稳定性理论,提升能源系统的信息安全性。

4.4.5 基于数据科学的能源互联网管理与运行模式

研究基于传感网和大数据的能源互联网态势感知技术,突破用户用能行为分析理论和方法,提出基于云计算和软件定义网络的能源互联网运维与控制等技术。

4.5 能源互联网的意义

能源互联网作为当前学术界和产业界共同关注的焦点,可对传统能源行业产生颠覆性的影响,其发展意义归纳如下:

1) 提高能效。通过多能互补融合和梯级利用, 显著提高能源综合利用效率。

2) 能源转型。促进高渗透率可再生能源的发展, 实现能源绿色转型。

3) 灵活便捷。提高能源行业资产的利用率和能源供给的灵活性, 提高能源生产、传输、消费、管理、交易、金融的便捷性。

4) 改造行业。改造能源行业传统的行业结构、市场环境、商业模式、技术体系与管理体制, 改变能源的生产和消费模式, 有助于促进能源体制改革, 推进能源行业的市场化和金融化。

5) 创新创业。去中心化后可促进众筹众创, 形成巨大的创新创业空间, 促进经济社会发展, 有利于创新驱动战略的实施。

4.6 能源互联网的发展潜力

在第三次工业革命的时代背景和国家能源革命、互联网+、创新驱动战略行动下, 能源互联网具有巨大的发展潜力, 将带动大批相关产业的发展。

能源互联网的发展潜力来源于能源行业自身的巨大体量和发展空间, 而目前大部分能源行业还没有被互联网所变革。2014 年世界五百强前 12 家企业中尚有 9 家是传统的能源、电力企业, 其 2014 年的营收总额为 3.2 万亿美元。2014 年我国全年能源消费总量 42.6 亿吨标准煤, 全社会用电量 5.5 万亿 kW·h, 仅仅是电力行业就有万亿元市场。此外, 我国快速且大规模开发建设的城镇、园区、绿色建筑、工业需求侧响应是推进能源互联网局域网发展最急需、也是最佳的切入点, 具备广阔的发展前景和机遇; 我国目前有超过 300 个城市启动了智慧城市的规划和建设, 为能源互联网广域网的发展提供了综合的平台和政府支持; 我国提倡建设的“一带一路”、亚洲基础设施投资银行、丝路基金等, 为能源互联网骨干网的发展提供了广阔的发展空间和国际市场。

能源互联网的发展也将带动许多新兴的能源市场, 包括新能源、电动汽车、储能、微网、能源管理服务, 以及相关的产业, 包括设备制造、通信、金融、软件等。

5 总结

能源互联网的提出和发展具有深刻的环境、经济、社会、技术和政策驱动力, 已经成为国内外学术界和产业界的关注焦点和创新前沿, 近几年发展迅速。目前提出的不同能源互联网概念各有侧重, 分别侧重全球电力互联、侧重多种能源耦合和侧重

能源信息融合, 但距离理想的能源互联网还有差距。本文认为能源互联网是能源和互联网深度融合的结果, 能够包容现有的理念, 但具有更深刻的内涵。开放是其核心理念, 互联网理念和技术的深度融合是其核心特征, 能源系统的类互联网化和互联网+是其基本架构。能源互联网将改变能源的生产、传输、消费方式和人们的生活工作方式, 成为推动我国能源转型、提高能源利用效率、实现节能减排和可持续发展的重要途径, 势必将对其他行业和整个社会产生深远影响。

参考文献

- [1] Rifkin J. third industrial revolution: how lateral power is transforming energy, the economy, and the world[M]. New York: Palgrave Macmillan Trade, 2011: 33-72.
- [2] 中国气象局, 国家气候委员会. 中国气候公报(2014 年)[R]. 北京: 中国气象局, 国家气候委员会. 2015.
- [3] 中美气候变化联合声明[R]. 北京: 2014.
- [4] Chandler W, 陈世平, Gwin H, 等. 中国的未来发电—2050 年中国可再生能源发电的最大潜力评估[R]. 马里兰州: 世界自然基金会, 2014.
- [5] 中丹可再生能源发展项目办公室. 中国可再生能源发展路线图 2050[R]. 北京: 中丹可再生能源发展项目办公室, 2014.
- [6] 解树江, 郭春兰. 2014 中国能源集团 500 强分析报告[N]. 中国能源报, 2014-12-1(4).
- [7] 李克强. 政府工作报告[R]. 北京. 2015.
- [8] Woetzel J, Orr G, Lau A, et al. China's digital transformation: the internet's impact on productivity and growth[EB/OL]. [2015-08-07]. http://www.mckinsey.com/insights/high_tech_telecoms_internet/china_s_digital_transformation/.
- [9] 中国互联网络信息中心. 第 35 次中国互联网络发展状况统计报告[R]. 北京: 中国互联网络信息中心, 2015.
- [10] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相. 电网和电网技术发展的回顾与展望——试论三代电网[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 1-11. Zhou Xiaoxin, Chen Shuyong, Lu Zongxiang. Review and prospect for power system development and related technologies: a concept of three-generation power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 1-11(in Chinese).
- [11] Li F, Qiao W, Sun H, et al. Smart transmission grid: vision and framework[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(2): 168-177.
- [12] Farhangi H. The path of the smart grid[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2010, 8(1): 18-28.
- [13] Amin S M, Wollenberg B F. Toward a smart grid: power delivery for the 21st century[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2005, 3(5): 34-41.
- [14] Ipakchi A, Albuyeh F. Grid of the future[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2009, 7(2): 52-62.
- [15] Mancarella P. MES (multi-energy systems): an overview of concepts and evaluation models[J]. Energy, 2013(65): 1-17.
- [16] Meibom P, Hilger K B, Madsen H, et al. Energy comes together in Denmark: the key to a future fossil-free danish power system[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2013, 11(5): 46-55.
- [17] 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.
- [18] 国家发展改革委员会, 国家能源局. 国家发展改革委、国家能源局关于改善电力运行调节促进清洁能源多发满发的指导意见[Z].

- 北京：国家发展改革委员会，国家能源局，2015。
- [19] 国家能源局综合司。国家能源局综合司关于当前开展电力用户与发电企业直接交易有关事项的通知[Z]。北京：国家能源局综合司，2013。
- [20] 国家能源局综合司。关于规范电力用户与发电企业直接交易有关工作的通知[Z]。北京：国家能源局综合司，2013。
- [21] 国家发展改革委员会。深圳市输配电价改革试点方案[Z]。北京：国家发展改革委员会，2014。
- [22] 国家发展改革委员会。关于贯彻中发[2015]9号文件精神加快推进输配电价改革的通知[Z]。北京：国家发展改革委员会，2015。
- [23] 国家发展改革委员会。国家发展改革委关于贵州省列入输配电价改革试点范围的批复[Z]。北京：国家发展改革委员会，2015。
- [24] 国家发展改革委员会，财政部。国家发展改革委、财政部关于完善电力应急机制做好电力需求侧管理城市综合试点工作的通知[Z]。北京：国家发展改革委员会，2015。
- [25] 国务院。国务院关于积极推进互联网+行动的指导意见[Z]。北京：国务院，2015。
- [26] 中共中央，国务院。中共中央、国务院关于深化体制机制改革加快实施创新驱动发展战略的若干意见[Z]。北京：中共中央，国务院，2015。
- [27] 国务院。能源发展战略行动计划(2014—2020年)[Z]。北京：国务院，2014。
- [28] Building the energy internet[EB/OL]。[2015-08-07]。http://www.economist.com/node/2476988。
- [29] 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。
- [30] Block C, Bomarius F, Bretschneider P, et al. Internet of energy-ICT for energy markets of the future[R]。Berlin: BDI, 2010。
- [31] 里米·里夫金。零边际成本社会[M]。北京：中信出版社，2014：67-87。
- [32] 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。
ZhaYabing, Zhang Tao, Tan Shuren, et al. Understanding and thinking of the energy internet[J]. National Defense Science and Technology, 2012, 33(5)：1-6(in Chinese)。
- [33] 刘振亚。智能电网与第三次工业革命[N]。科技日报，2013-12-5(1)。
- [34] 刘振亚。全球能源互联网[M]。北京：中国电力出版社，2015：199-254。
- [35] 中国工程科技发展战略研究院。2015中国战略性新兴产业发展报告[M]。北京：科学出版社，2014：163-205。
- [36] 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)。
- [37] 郑春满，李宇杰，刘勇，等。基于能源互联网背景的储能二次电池技术发展分析[J]。国防科技，2014，35(3)：14-19。
Zheng Chunman, Li Yujie, Liu Yong, et al. Development of secondary battery systems for energy storage in energy internet[J]. National Defense Science and Technology, 2014, 35(3)：14-19(in Chinese)。
- [38] 沈洲，周建华，袁晓冬，等。能源互联网的发展现状[J]。江苏电机工程，2014，33(1)：81-84。
Shen Zhou, Zhou Jianhua, Yuan Xiaodong, et al. Development and suggestion of the energy-internet[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2014, 33(1)：81-84(in Chinese)。
- [39] 查亚兵，张涛，黄卓，等。能源互联网关键技术分析[J]。中国科学：信息科学，2014(6)：702-713。
ZhaYabing, Zhang Tao, Huang Zhuo, et al. Analysis of energy internet key technologies[J]. Scientia Sinica Informationis, 2014(6)：702-713(In Chinese)。
- [40] 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(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(4)：1-10(in Chinese)。
- [41] 张涛，查亚兵。能源互联网在军事能源转型中的作用[J]。国防科技，2014，35(3)：1-5。
Zhang Tao, ZhaYabing. Effects of the energy internet on military energy transformation[J]. National Defense Science and Technology, 2014, 35(3)：1-5(in Chinese)。
- [42] 慈松，李宏佳，陈鑫，等。能源互联网重要基础支撑：分布式储能技术的探索与实践[J]。中国科学：信息科学，2014(6)：762-773。
Ci Song, Li Hongjia, Chen Xin, et al. The cornerstone of energy internet: research and practice of distributed energy storage technology[J]. Scientia Sinica Informationis, 2014(6)：762-773(in Chinese)。
- [43] 韩董铎，余贻鑫。未来的智能电网就是能源互联网[J]。中国战略新兴产业，2014(22)：44-45。
Han Dongduo, Yu Yixin. Future smart grid is energy internet[J]. China Strategic Emerging Industry, 2014(22)：44-45(in Chinese)。
- [44] 姚建国。需求侧互动响应：能源互联网的重要一环[J]。国家电网，2014(9)：50-51。
Yao Jianguo. Interactive demand side: an important part of the energy Internet[J]. State Grid, 2014(9)：50-51(in Chinese)。
- [45] Kroposki B, Garrett B, Macmillan S, et al. Energy systems integration a convergence of ideas[R]。Golden: NREL, 2012。
- [46] Geidl M, Koeppel G, Favre-Perrod P, et al. Energy hubs for the future[J]。IEEE Power & Energy Magazine, 2007, 5(1)：24-30。
- [47] Qadrdan M, Jianzhong W, Jenkins N, et al. Operating strategies for a GB integrated gas and electricity network considering the uncertainty in wind power forecasts[J]。IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(1)：128-138。
- [48] Liu X, Wu J, Jenkins N, et al. Combined analysis of electricity and heat networks[J/OL]。Applied Energy, http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261915001385。
- [49] FREEDM Systems Center. Future Renewable Electric Energy Delivery and Management (FREEDM) Systems[R]。Raleigh: FREEDM Systems Center, 2008。
- [50] B. A. U. M. Consult GmbH. Smart energy made in Germany[R]。Berlin: Munich/B. A. U. M. Consult GmbH, 2012。
- [51] 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。



孙宏斌

收稿日期：2015-08-17。

作者简介：

孙宏斌(1969)，男，教授，博士生导师，IET Fellow，教育部长江学者，国家级教学名师，国家杰出青年科学基金获得者，研究方向为智能电网、可再生能源和电动汽车接入电网、电力系统运行与控制，E-mail: shb@tsinghua.edu.cn；

郭庆来(1979)，男，博士，副教授，研究方向为无功电压控制和电动汽车入网技术，E-mail: guoqinglai@tsinghua.edu.cn；

潘昭光(1991)，男，博士研究生，研究方向为综合能源系统能量管理、需求侧响应，E-mail: panzg09@163.com；

王剑辉(1978)，男，博士，研究方向为电力系统运行与控制、智能电网，E-mail: jianhui.wang@anl.gov。

(责任编辑徐梅)