中国科学: 信息科学 2017 年 第 47 卷 第 2 期: 149–170
SCIENTIA SINICA Informationis
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

评述

能源互联网的发展现状与展望

周孝信, 曾嵘*, 高峰*, 屈鲁

清华大学能源互联网研究院, 北京 100084
* 通信作者. E-mail: zengrong@tsinghua.edu.cn, fgao@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2016–05–23; 接受日期: 2016–09–24; 网络出版日期: 2017–02–06

摘要 能源互联网是以可再生能源为优先, 以电力能源为基础, 多种能源协同、供给与消费协同、集中式与分布式协同, 大众广泛参与的新型生态化能源系统. 本文探讨了能源互联网的研究背景和意义; 剖析了能源互联网的基本内涵; 梳理了国内外能源互联网的发展动态与现状; 阐述了能源互联网需重点研究的科学技术问题; 展望了能源互联网的发展前景. 在互联网理念、先进信息技术与能源产业深度融合的基础上, 通过多能协同的能源网络、信息物理融合的能源系统、创新模式的能源运营, 实现绿色、协调、高效发展, 带动经济增长, 支撑能源革命.

关键词 互联网+, 能源革命, 能源互联网, 多能协同, 信息物理系统

1 引言

能源是人类生存和发展的重要基石, 是社会经济运行的动力和基础 [1,2]. 每一次工业革命都离不开能源类型和使用方式的革新, 其推动着人类社会的发展和进步 [3]. 目前, 第三次工业革命正在世界范围内发生, 而能源互联网是第三次工业革命的核心之一, 是未来能源行业发展的方向 [3,4].

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 [5~8]. 随着传统化石能源的逐渐枯竭以及能源消费引起的环境问题日益恶化, 未来人类发展与传统能源结构不可持续的矛盾不断尖锐, 世界范围内对能源供给与结构转变的需求愈发高涨, 从而催生新型能源结构与供给方式的提出 [9]. 以深入融合可再生能源与互联网信息技术为特征的能源互联网的提出, 将是实现能源清洁低碳替代和高效可持续发展的关键所在 [10,11].

发展能源互联网将从根本上改变对传统能源利用模式的依赖, 推动传统产业向以可再生能源和信息网络为基础的新兴产业转变, 是对人类社会生活方式的一次根本性革命 [12~14]. 我国《国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》提出, “将推进能源与信息等领域新技术深度融合, 统筹能源与通信、交通等基础设施网络建设, 建设 ‘源网荷储’ 协调发展、集成互补的能源互联网”. 当前我国正处在能

引用格式: 周孝信, 曾嵘, 高峰, 等. 能源互联网的发展现状与展望. 中国科学: 信息科学, 2017, 47: 149–170, doi: 10.1360/N112016-00135
Zhou X X, Zeng R, Gao F, et al. Development status and prospects of the Energy Internet (in Chinese). Sci Sin Inform, 2017, 47: 149–170, doi: 10.1360/N112016-00135

© 2017《中国科学》杂志社

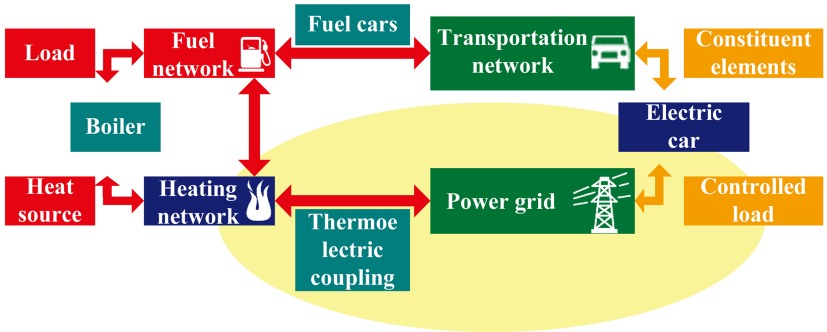

图 1 (网络版彩图) 不同类型能源的转换 (切换)

Figure 1 (Color online) The conversion (switching) of different types of energy

源革命的关键时期, 国家能源局《关于推进 "互联网+" 智慧能源发展的指导意见》的发布, 将在能源技术、生产、供应等多个环节激发 "链式变革", 是推动我国能源革命的必然选择 [15].

本文结合国家能源局能源互联网战略研究, 分析了能源互联网的提出背景, 初步提炼了能源互联网的形态与特征, 进而梳理了国内外能源互联网的发展动态与现状; 探讨了能源互联网需重点开展研究的科学技术问题; 最后, 结合我国相关能源政策和技术的发展方向, 对能源互联网的探索实现进行了展望.

2 能源互联网的形态与特征

能源互联网理念一经提出, 国内外不同行业和领域纷纷开展了有益的探索研究. 尽管各方认知的侧重点不同, 但基本都认同互联网与能源系统深度融合, 提高可再生能源的比重, 实现多元能源的有效互补和高效利用的理念.

2.1 能源互联网的形态

本文认为能源互联网可以分为三个层级, (1) 物理基础: 多能协同能源网络; (2) 实现手段: 信息物理能源系统; (3) 价值实现: 创新模式能源运营.

2.1.1 物理基础: 多能协同能源网络

能源协同以电力网络为主体骨架, 协同气、热等网络, 覆盖包含能源生产、传输、消费、存储、转换各环节的完整能源链. 能源互联依赖于高度可靠、安全的主体网架 (电网、管网、路网); 具备柔性、可扩展的能力; 支持分布式能源 (生产端、存储端、消费端) 的即插即用 [16,17].

能源转换是多能协同的核心, 其包括不同类型能源的转换 (切换) 以及不同承载方式的能源转换 (变换). 不同类型的能源转换 (切换) 在能源生产端除了常规的利用发电机等各种技术手段将一次能源转换成电力二次能源外, 还包括如电解水生成氢燃料、电热耦合互换等多种形式; 在能源消费端, 能源转换 (切换) 是指能源消费者可以根据效益最优的原则在多种可选能源中选择消费. 不同类型能源转换的基本示意图如图 1 所示. 不同承载方式的能源转换 (变换) 主要体现在能源传输环节, 如在天然气网中, 有液态和气态之间的转换.

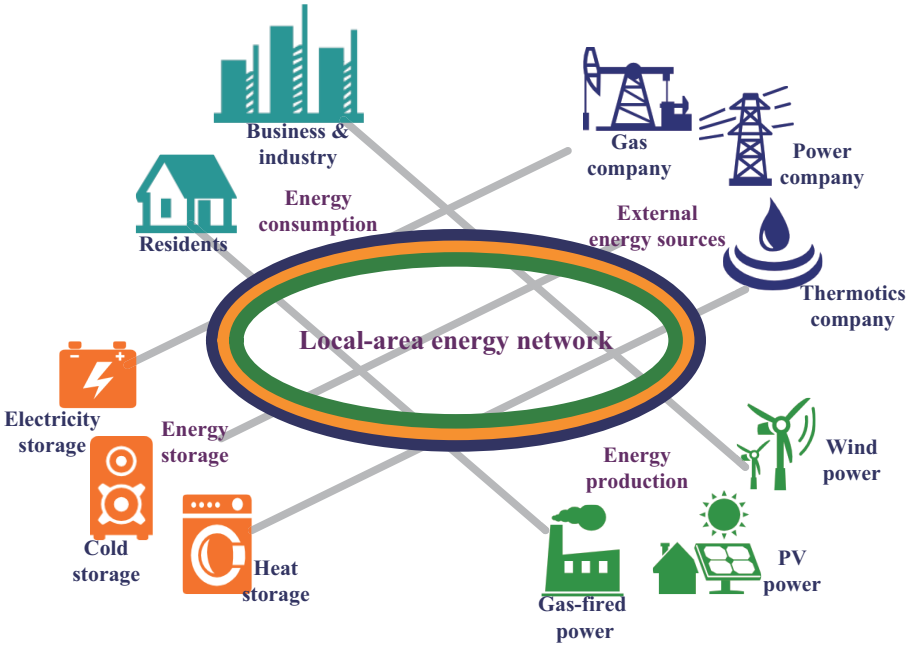

图 2 (网络版彩图) 能源局域网

Figure 2 (Color online) The local-area energy network

能源存储在多能协同的环境下必将愈发凸显其重要地位. 能源存储也不再局限于电能的存储与释放, 冰蓄冷、熔盐蓄热、氢气、压缩空气等均是能源存储的发展方向. 如果氢燃料电池以电动汽车等途径进入千家万户, 氢气或液氢的存储将可以提供持续的清洁可控电能, 成为分布式太阳能和风能的重要补充.

能源传输本身也具有多样性, 如可持续传输的电网、管网等方式, 非连续传输的航运、火车、汽车等, 因此能源互联网必将呈现出形态各异的实现方式.

多能协同能源网络将首先实现能源局域网, 以微电网技术为基础, 将冷、热、水、气等网络互联协调, 实现能源的高效利用, 如图 2 所示. 以能源局域网为基本节点, 以电网、管网为骨干网架, 由点及面形成广域互联, 即能源广域网. 多能协同能源网络为整个能源链的能源互补、优化配置提供了物理基础, 其整体效能的最大化离不开信息物理系统的融合.

2.1.2 实现手段: 信息物理能源系统

物联网、大数据、移动互联网等信息技术的飞速发展, 可为涵盖能源全链条的效率、经济、安全提供有效支撑. 智能电网 [18] 在信息物理系统 [19~21] 融合方面做了很多基础性的工作, 实现了主要网络的信息流和电力流的有效结合. 在能源互联网下, 信息系统和物理系统将渗透到每个设备, 并通过适当的共享方式使得每个参与方均能获取到需要的信息, 如图 3 所示. 信息物理融合的能源系统必将产生巨大的价值, 第一阶段的价值体现在信息获取上; 第二阶段的价值体现在优化管理上, 通过多能协同优化和调度, 可以从整个能源结构的角度实现社会总体效益最大化; 第三阶段的价值体现在创新运营上, 在信息开放、共享的基础上, 运用互联网思维, 创新商业模式, 带动市场活力, 实现经济增量.

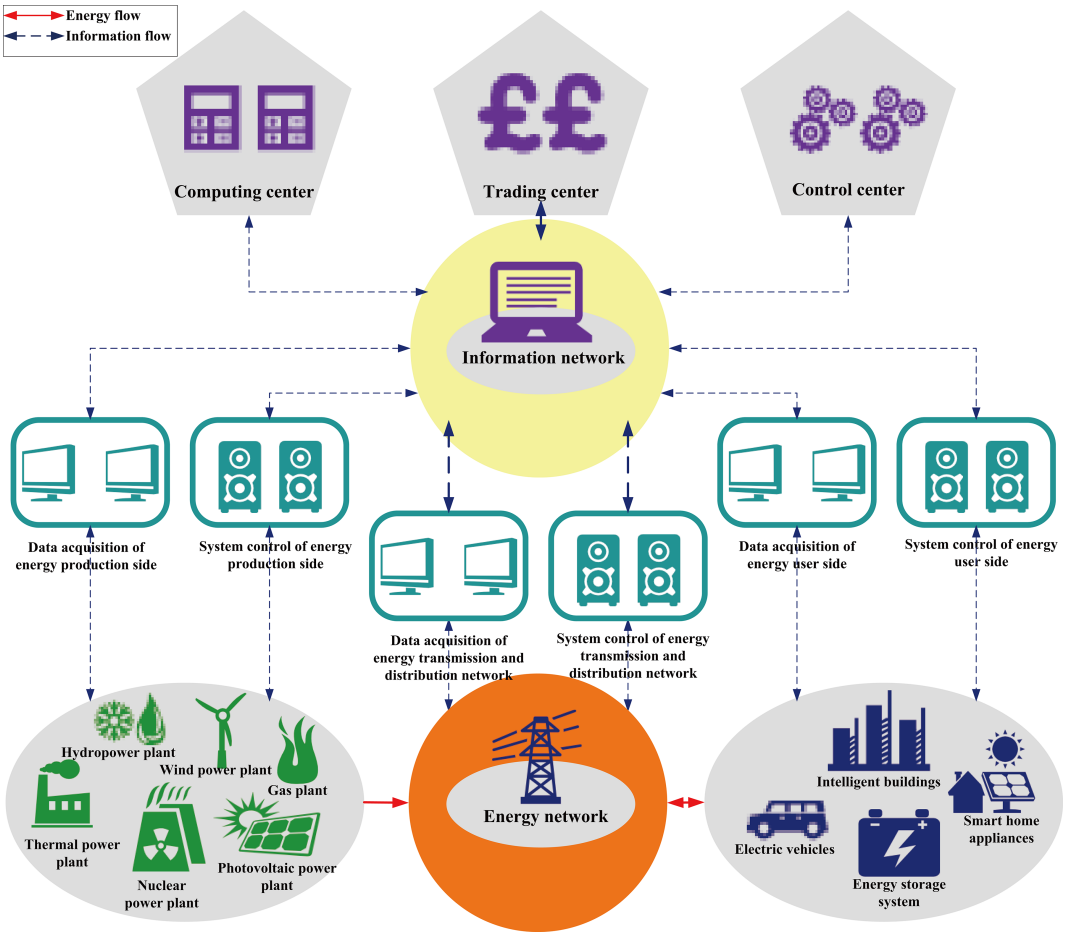

图 3 (网络版彩图) 信息物理能源系统基本示意图

Figure 3 (Color online) The basic schematic of the cyber-physical energy systems

2.1.3 价值实现: 创新模式能源运营

创新模式能源运营要充分运用互联网思维, 以用户为中心, 创造业务价值. 在具有活力的市场环境下, 包括能源生产、传输、消费、存储、转换的整个能源链相关方均能广泛参与, 必然会有一大批具有创新模式的能源企业脱颖而出, 比如能源增值服务公司、能源资产服务公司、能源交易公司、设备与解决方案的电子商务公司等, 从而带动能源互联网整体产业发展.

以能源消费环节为例, 传统的产业价值模式是能源供应商给能源消费者提供能源、可靠性和通用服务, 并从能源消费者获取收益. 而在能源互联网环境下, 除了能源、可靠性和通用服务外, 能源供应商还可以为能源消费者提供节能服务、环境影响消减以及个性化服务, 而能源消费者还可以在需要时反向为能源供应商提供能源、需求侧响应、本地化信息等, 从而使得信息流和资金流从单向变为双向. 另外, 还可以有第三方为其提供各种服务平台, 使得价值、信息和资金在这些平台上流转和交换, 如能量交易平台、能量聚合服务平台等等.

创新模式能源运营需要监管者能够致力于构建以传统电网为骨干, 充分、广泛和有效地利用分布式可再生能, 满足用户多样化能源电力需求的一种新型能源体系结构与市场; 为运营者提供一个能够与能源终端用户充分互动、存在竞争的能源消费市场, 使其提高能源产品的质量与服务, 赢得市场竞

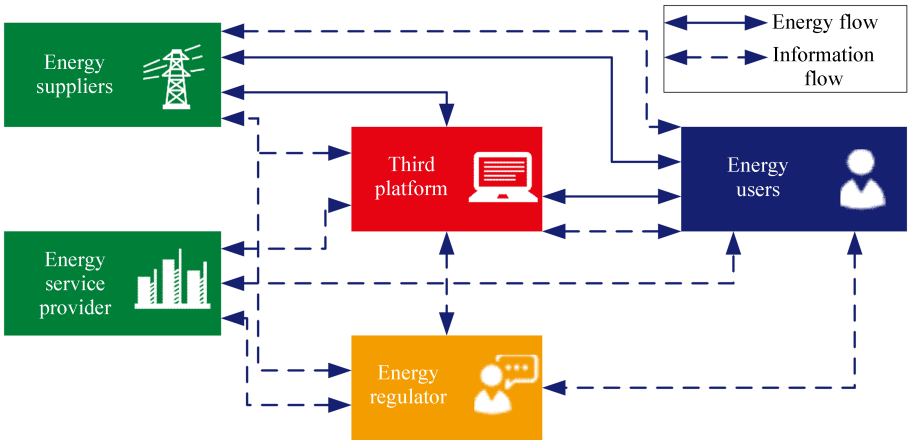

图 4 (网络版彩图) 创新模式能源运营

Figure 4 (Color online) The innovation mode of the energy operation

争; 不仅为能源终端用户提供传统电网所具备的供电功能, 还为其提供一个可以进行各种能源共享的公共平台, 如图 4 所示.

2.2 能源互联网的特征

在能源互联网上述三个形态层级的基础上, 本文总结出能源互联网的六大特征: 能源协同化、能源高效化、能源商品化、能源众在化、能源虚拟化、能源信息化 [15].

(1) **能源协同化** 通过多能协同、协同调度, 实现电、热、冷、气、油、煤、交通等多能源链协同优势互补, 提升能源系统整体效率, 资金利用效率与资产利用率.

(2) **能源高效化** 主要着眼于能源系统的效益、效用和效能. 通过风能、太阳能等多种清洁能源接入保证环境效益、社会效益; 以能源生产者、消费者、运营者和监管者等用户的效用为本, 推动能源系统的整体效能.

(3) **能源商品化** 指能源具备商品属性, 通过市场化激发所有参与方的活力, 形成能源营销电商化、交易金融化、投资市场化、融资网络化等创新商业模式. 探索能源消费新模式, 建设能源共享经济和能源自由交易, 促进能源消费生态体系建设.

(4) **能源众在化** 体现在能源生产从集中式到分布式到分散式实现泛在, 能源单元即插即用、对等互联, 能源设备和用能终端可以双向通信和智能调控. 能源链所有参与方资源共享、合作, 将促进前沿技术和创新成果及时转化, 实现开放式创新体系, 推动跨区域、跨领域的技术成果转移和协同创新.

(5) **能源虚拟化** 指借鉴互联网领域虚拟化技术, 通过软件方式将能源系统基础设施抽象成虚拟资源, 盘活如分散存在的铅酸电池储能存量资源, 突破地域分布限制, 有效整合各种形态和特性的能源基础设施, 提升能源资源利用率 [22].

(6) **能源信息化** 指在物理上把能量进行离散化, 进而通过计算能力赋予能量信息属性, 使能量变成像计算资源、带宽资源和存储资源等信息通信领域的资源一样进行灵活的管理与调控, 实现未来的个性化定制化的能量运营服务.

3 能源互联网的发展动态与现状

能源互联网作为当前国内外一个全新的研究热点, 多个国家的科研机构已经开展了初步的研究工作, 以力图在此次技术革命中占领先机, 并取得一定成果.

3.1 国外能源互联网的发展动态与现状

2004 年 *The Economist* 发表了 "Building the Energy Internet"[23], 首次提出建设能源互联网 (Energy Internet), 通过借鉴互联网自愈和即插即用的特点, 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, 以减少大停电及其影响. 此后国际上针对能源互联网进行了广泛的研究, 着力研究下一代能源系统. 2011 年, 美国学者杰里米 · 里夫金在其著作《第三次工业革命》[3] 中提出能源互联网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. 下面对欧盟、美国、日本等提出的能源互联网构想和相关项目进行介绍分析.

(1) 德国 —— E-Energy

2008 年 12 月德国联邦经济和技术部发起一个技术创新促进计划, 以信息通信技术 (information and communication technology, ICT) 为基础构建未来能源系统, 着手开发和测试能源互联网的核心技术. 之后, 德国联邦政府发起 E-Energy, 并将其作为国家性的 "灯塔项目", 旨在推动基于 ICT 技术的高效能源系统项目, 致力于能源的生产、输送、消费和储能各个环节之间的智能化 [24,25].

E-Energy 计划选取了 6 个示范项目, 分别由 6 个技术联盟来负责具体实施. 其中, 库斯科港的 eTelligenc 项目研究了大规模风力发电和供热需求之间的平衡; 哈茨地区的 RegModHarz 项目则充分利用该地区丰富的可再生能源, 结合拥有的抽水蓄能电站来实现电力供应; 莱茵 - 鲁尔地区的 E-DeMa 项目则使用户同时扮演能源生产者和消费者的角色, 从而加强用户与系统之间的互动; 斯图加特地区的 Meregio 项目则综合了 ICT 技术和智能电表, 来实现碳排放的有效控制 [26~28]. E-Energy 计划在 2020 年实现在电网中覆盖信息网络, 并使能源网络中所有元素都可通过互联网信息技术进行协调工作.

(2) 欧盟 —— Future Internet for Smart Energy

2011 年欧洲启动了未来智能能源互联网 (Future Internet for Smart Energy, FINSENY) 项目, 该项目的核心在于构建未来能源互联网的 ICT 平台, 支撑配电系统的智能化; 通过分析智能能源场景, 识别 ICT 需求, 开发参考架构并准备欧洲范围内的试验, 最终形成欧洲智能能源基础设施的未来能源互联网 ICT 平台 [29]. 荷兰电工材料协会致力于领导并推广欧盟的能源互联网建设, 希望通过建设能源互联网, 将数千个小型电厂产生的电流汇集并输送, 建立一个能基本实现自我调控的智能化电力系统.

(3) 瑞士 —— Vision of Future Energy Networks

Vision of Future Energy Networks 项目由瑞士联邦政府能源办公室和产业部门共同发起, 其重点是研究多能源传输系统的利用和分布式能源的转换和存储, 开发相应的系统仿真分析模型和软件工具 [30]. 该项目提出未来能源网络包含两个元素, 一是通过混合能源路由器 (hybrid energy hub) 集成能源转换和存储设备; 二是通过能源内部互联器 (energy interconnector) 实现不同能源的组合传输 [31,32]. 能源路由器主要由瑞士联邦理工学院开展研究.

能源路由器可采集并整合实时负荷预测与实时监测的分布式电源、配电网潮流数据, 对各发电侧及受控负荷侧进行优化控制; 可实现不同能源载体的输入、输出、转换、存储, 是能源生产、消费、传输基础设施的接口设备, 是电网系统中的一个广义多端口网络节点 [33,34].

表 1 能源互联网的 4 种典型认知方式

Table 1 Four typical cognitive styles of the Energy Internet

Cognitive style	Main features	Typical representative
Energy Internet	Focus on the structure expression of the energy network	America, FREEDM
Internet of Energy	Focusing on the expression of the information Internet	Germany, E-energy
Intenergy	Emphasis on the integration of the Internet technology and the energy networks	Japan, power network router
Multi-Energy Internet	Emphasis on the joint transmission and use of electric, thermal and chemical energy	Switzerland, VFEN

(4) 美国 —— Future Renewable Electric Energy Delivery and Management

2008 年, 美国国家科学基金项目在北卡罗莱纳州立大学启动 "未来可再生电能传输与管理系统"(Future Renewable Electric Energy Delivery and Management System, FREEDM), 并建立了 FREEDM 系统研究院, 由 17 个科研院所和 30 余个工业伙伴共同参与. 该项目重点研究适应高渗透率分布式可再生能源发电和分布式储能并网的高效配电系统, 并称之为能源互联网 (Energy Internet)[35].

FREEDM 项目对能源互联网的描述为, 综合运用先进的电力电子技术, 信息技术和智能管理技术, 将大量由分布式能量采集装置, 分布式能量储存装置和各种类型负载构成的新型电力网络节点互联起来, 以实现能量双向流动的能量对等交换与共享网络. 其主要特点是通过固态变压器接入中压配电网的多种负荷、储能设备及可再生能源转换成电能后可实现即插即用、故障快速检测和处理、配电网智能化管理; 在中压配电网还是以交流方式传输电能, 直流负荷、分布式电源在固态变压器的接入端口接入中压配电网 [36,37]. FREEDM 项目的核心在于将电力电子技术和信息技术引入电力系统, 效仿通讯网络中路由器的概念, 提出能源路由器的概念并实施初步开发, 以希望在未来的配电网层面构建能源互联网, 实现分布对等的系统控制与交互 [38,39].

(5) 日本 —— 数字电网路由器

2010 年, 日本启动 "智能能源共同体" 计划, 开展能源和智能电网等领域的研究. 2011 年, 日本开始推广 "数字电网" 计划, 该计划是基于互联网的启发, 构建一种基于各种电网设备的 IP 来实现信息和能量传递的新型能源网. 通过提供异步连接、协调局域网内部以及不同局域网系统的数字电网路由器, 并将其与现有电网及互联网相连, 通过相当于互联网地址的 "IP 地址" 识别发电设备及用电设备在内的装置, 由此进行统筹管理与能量调度 [40,41]. 在 2011 年所展示的马克一号 DGR (数字电网路由器) 使用了绝缘栅双极型晶体管等电力电子设备, 通过电网频率跟踪来调整电压的大小. 目前, 日本数字电网联盟已在肯尼亚未通电地区开展数字电网路由器试验研究 [40,41].

由上, 当前国外对能源互联网的典型认知方式主要有 4 种, 见表 1. 尽管各方认知方式的侧重点有所不同, 但都是将互联网技术运用到能源系统, 把一个集中式的、单向的、生产者控制的能源系统, 转变成大量分布式辅以较少集中式的新能源与更多的消费者互动的能源系统, 以提高可再生能源的比重, 实现多元能源的有效互联和高效利用.

3.2 国内能源互联网的发展动态与现状

早在 20 世纪 80 年代, 清华大学前校长高景德便提出了 "CCCP" (现代电力系统是计算机、通信、控制与电力系统以及电力电子技术的深度融合) 的概念. 近年来, 国内快速发展的智能电网也不断强调信息技术与现代电网的紧密结合. 2012 年 8 月首届中国能源互联网发展战略论坛在长沙举行, 对能

源互联网概念进行了初步介绍 [42]. 2013 年 12 月, 北京市科学技术委员会组织 “第三次工业革命” 和 “能源互联网” 专家研讨会. 2014 年 2 月, 国家能源局委托江苏现代低碳技术研究院开展 “能源互联网战略研究” 课题. 2014 年 6 月, 中国电力科学研究院牵头承担国家电网公司基础前瞻性项目 “能源互联网技术架构研究”, 着力构建未来能源互联网架构, 搭建相应的能源互联网研究平台. 中国科学院学部开展 “我国新一代能源系统战略研究” 课题, 提出了新一代能源系统的理念.

随着党的第十八次全国代表大会提出能源革命战略, 2015 年政府工作报告推出 “互联网+” 行动计划, 能源与互联网正不断实现深度融合, 极大地促进了国内能源互联网的发展. 2015 年 4 月, 国家能源局首次召开能源互联网工作会议. 2015 年 4 月, 由清华大学发起并组织, 以 “能源互联网: 前沿科学问题与关键技术” 为主题的香山科学会议在北京香山饭店召开, 为我国能源互联网的发展建言献策, 在国内外产生了重要影响. 2015 年 6 月, 国家能源局开展 “国家能源互联网行动计划战略研究”, 并将其作为国家 “互联网+” 行动计划的重要载体, 清华大学牵头承担其中能源互联网的形态特征、关键技术和技术标准、商业模式、效益评价等五个重点课题. 2016 年 2 月, 国家发展与改革委员会、能源局、工业和信息化部联合发布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》[43], 提出了能源互联网的路线图, 明确了推进能源互联网发展的指导思想、基本原则、重点任务和组织实施. 2016 年 3 月, 国家 “十三五” 规划纲要 [44] 明确提出 “将推进能源与信息等领域新技术深度融合, 统筹能源与通信、交通等基础设施网络建设, 建设 ‘源网荷储’ 协调发展、集成互补的能源互联网.” 2016 年 4 月, 国家发展与改革委员会、能源局正式发布《能源技术革命创新行动计划 (2016–2030 年)》, 为未来我国能源互联网技术的发展制定了行动计划. 目前, 中国电力企业联合会牵头并组织清华大学等高校和科研机构正在开展国家能源互联网系统标准的制定. 此外, 清华大学、国防科技大学、华北电力大学、天津大学、中国电力科学研究院等高校与科研机构, 从能源互联网的基本概念及形态、发展模式及路径、技术框架及拓扑、关键技术分析等方面展开了广泛的研究.

从目前的情况来看, 能源互联网已经受到了国内各级政府和研究机构的高度重视, 能源互联网的理念与技术也已在国内引起了越来越广泛的关注, 正逐渐由以基础性研究为主的概念阶段, 向以应用性研究为主的起步阶段转变.

3.2.1 基本概念及形态

目前对能源互联网的概念及技术形态有多种理解方式, 这里对较有代表性的几种观点进行综述. 文献 [45～47] 提出, 能源互联网是以互联网思维与理念构建的新型信息能源融合 “广域网”, 它以大电网为 “主干网”, 以微网、分布式能源等能量自治单元为 “局域网”, 强调用互联网的理念改造传统能源产业的结构、设备和控制形态以实现根本革新, 真正实现信息能源基础设施的一体化, 实现能源的双向按需传输和动态平衡使用. 文献 [48～52] 认为能源互联网是以电力系统为中心, 智能电网为骨干, 互联网、大数据、云计算及其他前沿信息通信技术为纽带, 综合运用先进的电力电子技术和智能管理技术, 将电力系统与天然气网络、供热网络以及工业、交通、建筑系统等紧密耦合, 横向实现电、气、热、可再生能源等 “多源互补”, 纵向实现 “源网荷储” 各环节高度协调, 生产和消费双向互动, 集中与分布相结合, 能源与信息高度融合的下一代能源体系.

3.2.2 发展模式及路径

能源互联网的建设成本高、建设周期长, 除了技术瓶颈需要攻关之外, 其发展还必然受到政策、经济、社会等多方面因素的影响, 因此需探索能源互联网的发展模式及路径. 文献 [53, 54] 提出以全球能

源互联网的模式发展能源互联网, 其是以特高压为骨干网架 (通道), 以输送清洁能源为主导, 全球互联泛在的坚强智能电网. 文献 [55, 56] 对能源互联网可能存在的商业模式进行了归纳分析, 提出能量耦合、价格耦合、衍生交易 “三位一体” 的能源互联网交易体系以及能源互联网交易的微平衡理论.

3.2.3 技术框架及拓扑

能源互联网的架构设计及其宏观拓扑结构是影响系统功能和特性的重要研究基础之一, 是研究能源互联网若干复杂性问题的基础理论框架. 研究能源互联网的技术框架及拓扑模型, 可以此为基础解决能源互联网中一系列复杂性问题. 文献 [57] 对能源互联网的需求推动作用进行分析, 建立了能源互联网的技术框架模型. 文献 [58] 从能源融合提升可持续供应能力、信息融合转变能源发展方式、业务融合创新产业生态三个层面提出能源互联网价值实现的基本架构. 文献 [59, 60] 利用复杂网络理论, 从宏观结构角度建立能源互联网拓扑模型, 为后续研究能源互联网系统的设计与优化提供参考.

3.2.4 关键技术分析

为有效推动能源互联网的发展, 需要对能源生产、传输、存储、服务环节中的关键技术进行研究, 以促进未来能源互联网的发展. 文献 [61~64] 对能源互联网的关键技术进行了梳理, 主要包括: 新能源发电技术、大容量远距离智能输电技术、先进电力电子技术、先进储能技术、智能能量管理技术、先进信息技术、可靠安全通信技术、系统规划分析技术和标准化技术等, 并对各项关键技术所涉及的科学问题进行了分析与探讨, 以期为我国能源互联网的发展提供参考.

3.2.5 未来电力系统

对于能源互联网下的电力系统, 文献 [65] 提出建设以非化石能源发电占较大份额和智能化为主要特征的三代电力系统, 其是可持续发展和智能化的电网模式. 文献 [66 ~ 68] 探讨了能源互联网下的新型配电网, 并从结构形态、设备形态、控制与运行形态和产业形态等方面分析了未来配电系统形态及其技术特点. 文献 [69] 对柔性直流技术在能源互联网中的应用价值进行探讨, 并提出柔性直流技术在未来能源互联网中的 2 种应用方案. 文献 [70] 以分布式可再生能源发电为基础, 建立包含分布式能源、储能装置、智能终端等构成的能源互联网系统.

此外, 文献 [71] 分析了能源互联网对能量管理系统所提出的新要求, 提出了适合能源互联网能量管理系统的分层递阶式控制架构. 文献 [72] 指出软件定义方法更能满足能源互联网信息通信的需求. 将信息路由和能量路由相对应, 网络控制与能源互联网运行调度相结合, 给出一体化的实现方法, 并进行了实验验证. 文献 [73] 提出了能源互联网标准体系架构, 给出了其内涵和使用方法; 结合能源互联网建设需求和新技术的发展, 提出了能源互联网标准体系包含的主要标准内容, 给出了标准化工作建议.

4 需重点开展研究的科学技术问题

能源互联网作为能源技术和互联网技术与思维的深度融合, 涵盖了材料、器件、设备、系统、通信、信息等多方面的技术环节, 以及政策、金融、运营、管理等多方面的非技术环节, 结合能源互联网的三个层级和能源链的五个环节, 形成如图 5 所示的能源互联网技术体系. 能源互联网的发展需要在

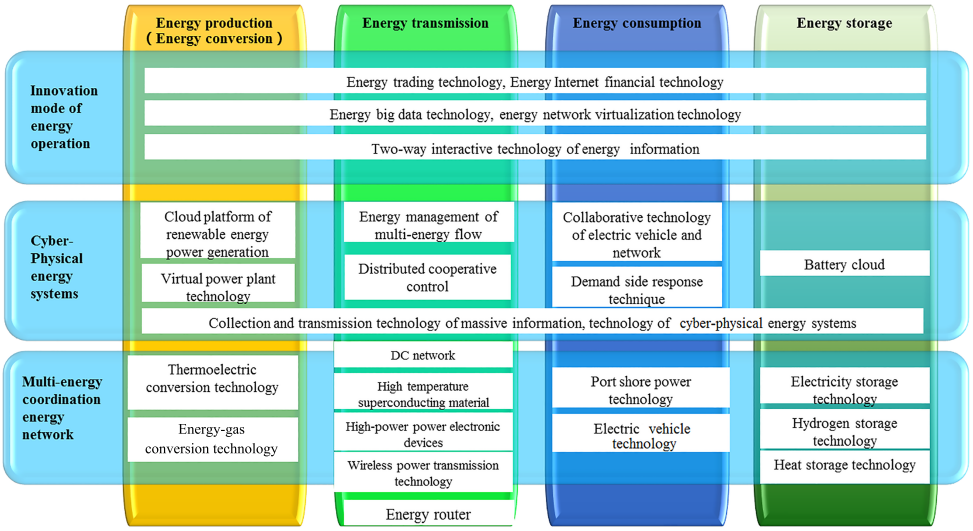

图 5 (网络版彩图) 能源互联网的技术体系

Figure 5 (Color online) The technical system of the Energy Internet

“能源生产、能源储运、能源消费、能源管理” 各个环节, 针对每个重点创新研究方向, 分别开展基础前沿技术创新研究、关键技术与设备攻关研究、示范应用于产业转化研究.

4.1 多能协同能源网络关键技术

4.1.1 高温超导材料

高温超导材料, 是具有高临界转变温度且能在液氮温度条件下工作的超导材料. 未来需开展支持高温超导基础理论、各系材料配方及其制备工艺基础研究; 开展新型高温超导材料研究, 为超导电缆、变压器、限流器等低损耗能量流传输设备的研发提供支撑. 高温超导材料在电力系统中有很好的应用前景, 要对新型的具有更高工作温度的高温超导材料进行研究, 以降低超导材料应用的难度和成本 [74,75]. 针对不同的应用对各系高温超导材料的特性及其制备工艺进行研究; 针对超导电缆、变压器、限流器、超导电机等应用开展研究, 降低能量流转换设备的损耗; 推动高温超导材料的实用化, 开展高温材料成套工程技术.

4.1.2 大功率电力电子器件

以 SiC、GaN 等材料为代表的宽禁带电力电子器件具有有禁带宽度大, 电子漂移饱和速度高、介电常数小、导电性能好等优点, 已经被公认为第三代电力电子器件的发展方向 [76~80]. 预计到 2020 年, SiC 和 GaN 功率器件将分别获得 14% 和 8% 的电力电子市场份额, 并将继续保持高速增长. 需开展基于硅基、SiC 和 GaN 的高压大功率电力电子器件研究; 推进以 SiC, GaN 等材料为代表的宽禁带电力电子器件的应用开展研究, 推动电力电子变换器在电力网络中的应用; 研发高压、大电流瞬态开断电力电子器件, 为高压大容量直流断路器、断路保护器的研发提供支撑; 支持新一代高压大功率电力电子器件的材料生长与掺杂、器件及封装等关键技术工艺研究; 建设高水平生产工艺线, 降低器件成本, 支持大功率电力电子器件国产化. 解决新一代高压大功率电力电子器件的材料生长与掺杂、器件及封装等问题, 为高压大容量直流换流器、断路器的研发提供支撑.

4.1.3 能量路由器

能量路由器是新一代能源管理系统的具体实施装置, 在实际应用中智能管理系统的调控指令, 包括能源的高效传输、低损耗转换、高度能量自由路由等 [81~83]. 需要标准化能量路由器的功能和作用, 建立以能量路由器为核心设备的新一代能源互联网, 为高比例可再生能源及储能的接入、高级能源管理与信息交互、自下而上自治组网和以用户为导向的市场模式等提供技术支撑. 对社会资本开放能源供应、管理、服务市场, 以碳交易等方式鼓励清洁能源的接入, 从而为能量路由器的应用提供必要的土壤. 以含光伏发电和储能站的工业园区为试点对象, 建设以能源路由器为核心的局域能源互联网示范工程.

4.1.4 直流电网

直流电网将是能源互联网中骨干网架以及配用电和微电网的核心, 是实现能量高效率、低成本传输的关键. 需要重点推进直流电网标准化进程, 构建直流电网技术标准体系; 支持换流器、直流断路器 [84]、直流变压器 [85] 及能量路由器、直流电缆 [86]、直流电网控制保护等核心设备研发和工程化; 建设包含大规模负载群、分布式新能源、大规模储能在内的直流电网示范工程, 实现直流电网在集中和分布新能源消纳、电动汽车储能系统接入、综合能源网、城市配电扩容、大型数据中心或居民小区等不同场景应用; 推进直流电网的工程化、商业化应用 [87,88].

4.1.5 无线电能传输技术

无线电能传输技术无需电线连接就可以实现电能的传送, 是一种更安全、更便捷的电能传输方式 [89,90]. 以电动汽车无线充电为无线电能传输技术的突破点和应用对象, 需研发高效率、低成本的无线电能传输系统以及相应的有序充电管理系统, 实现电动汽车的即停即充和充电场站的负荷管理. 将便捷安全的无线充电技术纳入电动汽车基础建设的发展规划中, 鼓励无线充电系统的建设, 鼓励社会资本参与电动汽车基础设施的建设, 允许社会资本从事充电站的经营. 联合整车厂商、无线充电设备制造厂商、汽车租赁服务方、供电部门等各方的力量, 在电动汽车相对集中的局部区域, 建设电动汽车无线充电场站的示范工程.

4.1.6 储能技术

能源互联网具有能量源的不确定性与能量流的无秩序性, 而储能成为解决上述两大问题的支撑性基础 [91]. 储能技术作为能源互联网的关键支撑技术, 目前正处在一个关键时期, 面临着关键技术研发与路线选择、推广应用、成果转化等难题 [92~94]. 技术方面, 需支持关键材料的研发、制造工艺和能量转化效率的提升, 开发大容量、低成本、长寿命的储能系统, 包括氢储能、压缩空气储能、储热等系统级储能, 替代传统铅酸电池的钠盐电池, 可快速充放电、长寿命的锂离子电池, 高储能密度的超级电容等, 同时支持技术发展路线研究, 对储能技术的发展提供指导; 推广应用方面, 积极培育储能产业链下游应用市场, 针对分布式发电、需求响应、电力调频等领域, 开展储能示范项目, 同时进行配套政策机制建设, 创造储能商业化应用条件; 成果转化方面, 除促进科研院所相关成果转化外, 需加大对企业科研成果转化的支持力度, 从而加速储能技术研发到产业化的过程.

4.1.7 能气转换技术

能源转换是多能协同的核心. 需鼓励能源品质检测, 宽负荷运行条件下火电机组性能监测与运行优化, 多能协同的分布式能源系统, 发电/储能一体化燃料电池, 可再生能源电力 CO_2 电化学转化, 区域热能品位调节的热泵等关键技术研究, 鼓励和支持电站等能源转化企业和研究机构进行联合技术创新, 积极研发、采用和示范适合能源互联网发展的关键技术, 选取 300 MW 以上火电机组进行煤质检测、性能监测与优化等技术示范, 建立多能协同的分布式能源系统示范基地.

4.1.8 电动汽车技术

根据能源互联网分布、开放的技术特点, 基于电池能量信息化和互联网化技术及用户侧能量运营模式, 开展能源互联网电动车的关键技术的理论研究. 建立能源互联网电动车的一系列关键技术标准、电动汽车电池梯次利用体系, 以及电动车能量运营市场和模式. 与电动汽车设计公司、整车生产厂、电动汽车运营公司、电池能量运营公司和金融租赁公司等一同开展能源互联网电动汽车的试点工作. 研究电动汽车充电设施的空间优化规划, 根据道路交通信息及配网现状将快速充电站、充电桩规划在合理位置; 研究电动汽车集群的分层、分布式充放电优化控制策略, 实现对电动汽车充放电的控制引导和与负荷、新能源的有效互动, 通过对电动汽车的控制平抑负荷波动、消纳新能源; 研究基于大数据分析的实时信息发布机制, 通过反映发电成本、阻塞成本、电网固定成本的实时节点电价, 引导电动汽车到合适的充电站充电, 从而缓解电网阻塞, 提升电网安全经济运行水平 [95~97].

4.1.9 港口岸电技术

港口岸电技术是指船舶靠港期间, 停止使用船舶上的发电机, 而改用陆地电源供电. 需针对船舶岸基供电系统开展船岸协同无缝并网 [98]、高可靠防灾预制舱、多渠道缴费、远程管理与故障诊断、多元投资主体商业模式等方面的研究; 建议将靠港船舶的减排量计入地方政府的减排量考核范围, 发布强制要求规定靠泊我国港口的船舶减排标准、岸电接入能力要求、时间表、激励政策, 设立港口配置靠港船舶使用岸电设施专项资金, 制定发布船舶使用岸电充电服务费计费规则, 建议电网公司向社会发布岸电配套供电设施优惠政策与技术要求.

4.2 信息物理能源系统关键技术

4.2.1 海量信息采集与传输技术

能源互联网需实现信息的快速、广泛、准确采集, 通过信息交互, 实现不同区域、不同类型的能源生产与消费者能量双向流动与优化控制. 在信息采集层面, 需从能源互联网应用需求出发, 研究低成本、低冗余、高可靠、可扩展、可定制的新型海量信息采集技术体系架构与高效传输处理核心技术理论; 研究新型能源互联网海量信息技术与信息物理系统数据、终端客户信息、物理网络数据的大数据处理与融合技术理论; 建立跨部门、跨行业的数据连接和共享机制, 数据采集和交换平台、数据存储和数据安全机制; 在条件具备的地区, 开展跨行业跨领域的海量信息采集处理及共享的试点工程. 在信息传输层面, 需推进研究电力线频谱资源动态、高效的感知与使用; 电力线通信系统中对干扰灵活、有效地降低; 降低对已有通信业务干扰等关键技术, 最终形成宽带电力线通信的技术标准体系并开展相关标准的产业化工作. 这对大规模的可持续能源利用、对能源互联网的大规模实际应用均具有重要意义.

4.2.2 信息物理能源系统融合技术

信息物理能源系统融合技术研究包括用户需求建模方法、系统演化模型、系统结构优化技术、系统接口与标准协议、多个信息物理能源系统的网络协同控制技术等. 需建立开放的信息物理能源融合技术接口标准, 制定不同场景下的信息物理能源系统融合的技术性能指标挑选 1~2 个有能源互联网代表意义的行业系统应用 (分布式储能) 开展信息物理能源系统融合技术的试点工作 [19~21].

4.2.3 新能源发电云平台

新能源发电云平台的发展需对以新能源发电为主要形式的多能集成和以需求响应为代表的新型能源消费开展理论研究, 如新能源发电精准预测、基于大数据与行为心理学的负荷调度及结算、新能源发电优先的交易模型等. 并研究这些理论在云平台上落地的关键技术. 建立开放的能源市场体系, 允许负荷聚类商、代理商等主体的出现. 在辅助服务市场相对完善的地区开展为确保新能源多发满发而调峰的传统电厂补偿、电动汽车充放电、负荷聚类商等形式的服务试点工程.

4.2.4 虚拟发电厂

虚拟发电厂打破了传统电力系统中物理上发电厂之间、以及发电和用电侧之间的界限, 充分利用网络通信、智能量测、数据处理、智能决策等先进技术手段, 有望成为包含大规模新能源电力接入的智能电网技术的支撑框架 [99,100]. 需加大在能源网络通信设备、能源数据采集设施、能源生产消费调控设备等基础设施的建设和投入, 支撑虚拟发电厂物理层面的建设. 需支持对分布式的能源的预测、区域多能源系统综合优化控制、复杂系统分布式优化等方面的研究, 支撑虚拟发电厂调控层面的建设. 需为虚拟发电厂正常参与到多能源系统的能量市场、辅助服务市场、碳交易市场等创造宽松的环境, 支撑虚拟发电厂市场层面的建设. 在能源系统信息化、自动化程度较高, 分布式能源较为丰富的地区优先开展相应的试点工作, 为虚拟发电厂的推广与应用提供示范.

4.2.5 多能流能量管理

能源互联网中具有多种能量生产、传输、存储和消费设备, 拓扑结构动态变化, 具有典型的非线性随机特征与多尺度动态特征, 为了实现对能源互联网内部能量设备的 “即插即用” 管理以及多能源局域网之间的分布式协同控制, 需要在能源互联网中引入智能能量管理技术 [101,102]. 多能流能量管理技术涉及冷、热、电、气、交通等多学科跨领域联合攻关, 需要在基础理论方面开展深入研究, 建议尽快通过多渠道进行立项, 重点突破多能流综合能源系统建模、多能流耦合状态估计、多能流联合潮流分析、多能流安全评估与预警、多能流优化调度与控制等关键技术难点, 在项目研究过程中形成产学研用相结合、多学科交叉互补的技术团队. 同时, 选定具有良好示范条件的园区 (涵盖光伏等可再生能源、多种储能形式、冷热电多类型负荷、冷热电三联供分布式发电等核心元素), 尽快开展示范工程建设.

4.2.6 分布式协同控制

分布式协同控制是未来能源互联网信息物理系统架构下的重要特征. 需重点研究分布式状态估计技术、分布式优化技术、分布式控制技术等关键基础理论, 对比集中式、完全分布式、集中分布式等不同模式的通信代价与实施效果, 确定不同应用场景下的最优技术路线. 结合能源互联网试点工程, 分别在配网级、园区级和楼宇级完成示范应用.

4.2.7 电动汽车协同技术

电动汽车协同技术是指通过电动汽车与充电设施网络、电力网络、交通网络和新能源发电的协同, 达到方便用户出行、较少充电设施投资、优化电网运行、提高新能源发电消纳水平的目标. 需重点从电动汽车协同的通信与充电设施接口标准、电动汽车充放电智能调度技术和商业运营模式三个方面开展工作, 积极推动电动汽车协同的相关标准化建设、鼓励和引导新的商业运营模式应用、支持相关智能调度技术的研发, 在电动汽车或新能源发展较好的地区开展电动汽车协同的试点示范.

4.2.8 需求侧互动技术

需求侧互动技术是建设能源互联网的关键技术之一 [103,104]. 需鼓励对多种形式能源集成的综合响应、基于大数据与行为心理学交叉学科的需求响应建模、需求响应资源辨识与量化、需求响应计量和需求响应参与辅助服务结算等关键技术的理论研究; 建立开放的能源市场体系, 允许负荷聚类商、代理商等的出现, 充分挖掘激发用户响应潜力, 允许并重视需求响应参与到系统调峰、调频等辅助服务市场; 在能源辅助服务市场相对完善的地区开展电动汽车充放电、负荷聚类商等各种形式的需求响应服务试点工程.

4.2.9 电池云

为了提高存量巨大、碎片化存在的电池储能设备 (如铅酸电池和电动汽车电池) 的利用率, 需开展能量信息化与网络化管控技术研究, 通过互联网进行管控和运营以提高电池储能设备的有效利用率; 建立电池云运营平台和电池云的建设与使用补贴政策; 开展电池云理论在存量铅酸电池盘活利用和分布式电动汽车电池能量运营等行业中的应用试点工作.

4.3 创新模式能源运营关键技术

4.3.1 能源大数据分析

"大数据" 在物理学、生物学、环境生态学等领域以及军事、金融、通讯等行业存在已有时日, 成为云计算、物联网之后又一大颠覆性的技术革命 [105~107]. 能源互联网的发展与大数据密不可分. 能源互联网通过信息通信对整个网络的设备和设施进行及时监控, 同时对历史和实时数据进行充分挖掘以提升能源互联网的运行管理和性能优化 [108~110]. 需在能源大数据领域开展多源数据 (电、煤、油、气等能源领域数据及人口、地理、气象、经济、交通等其他领域数据) 集成融合与价值挖掘的关键技术研究, 开展能源大数据引导政府决策、企业业务水平与服务质量提升以及能源产业商业模式创新的高级应用研究, 开展新能源与电动汽车大数据、输变电大数据、配用电大数据等应用环节的试点示范.

4.3.2 能源网络虚拟化技术

能源互联网络是面向广域部署、用户参与的大型网络系统, 融合能源流和信息流的调度与管理, 需要在基础理论方面开展深入研究 [22], 重点突破关键系统技术, 如核心关键网络基础设施、安全机制等的设计与建设等技术和运营难点. 可由相关大学、具备网络运营能力的企业等共同开展, 在项目研究过程中形成产学研用相结合、多学科交叉互补的技术和运营团队; 同时, 选定具有良好示范条件的城市或园区, 尽快开展示范工程建设.

4.3.3 信息双向互动平台

用户参与并引导社会力量广泛参与是搭建能源互联网的关键, 用泛在的可再生能源替代传统能源, 可以降低产品成本, 提高产品竞争力, 并创造更多的就业机会. 用户的广泛参与并不是说传统电力企业在能源互联网时代将扮演不重要的角色, 传统电力企业依旧是能源互联网的最主要承担者. 在能源互联网时代, 部分传统优质电力企业将充分利用在智能电网方面的丰富经验将成千上万个分布式能源生产企业或用户接入主干电网, 从而完成自身从传统的集电力生产、传输、运营于一体的单一电力能源生产商转型成为电网管理运营服务的运营商. 另外创新型企业也将在能源互联网领域搭建类似 "淘宝" 这样的能源互动交易平台, 从而真正实现能源的双向按需传输和动态平衡使用, 最大限度地适应新能源的接入和生产.

4.3.4 能量交易平台技术

能源互联网的发展离不开市场机制, 需要能量交易平台的支撑. 未来需加强对能市场机制的设计、能量交易体系的构建、能源市场化与自由交易对能源系统安全稳定影响等方面理论的研究的. 鼓励多元的交易主体、商品和类型复杂相互作用的模拟交易平台开发, 对可能存在的各种问题进行推演分析, 确保交易机制设计的合理性. 降低能源市场的准入, 维持交易的活跃性; 推进能源数据的开放, 实现交易的透明化; 加强能源市场的监管, 保障交易的公平性. 鼓励在经济较为发达的各地区根据当地能源生产消费特点, 开展相应的能源交易试点工作.

4.3.5 能源互联网金融技术

能源互联网金融是采用互联网的手段和方式, 为能源互联网的金融服务提供新的途径和支撑. 能源互联网金融技术涉及能源生产、传输、存储和消费等全生命周期追踪, 需与能源交易、调度、管理等技术紧密结合. 能源互联网金融的发展将在能源互联网的推进过程中发挥重大作用. 需由相关主管单位、具备能源互联网金融技术和运营能力的企业、城市政府等共同开展城市级别的试点示范, 在项目研究过程中形成产学研用相结合, 能源、金融、互联网基础设施技术和运营等多学科交叉互补的综合团队, 重点突破去中心化能源金融平台等核心技术.

解决能源互联网领域信用及交易问题的一种可行方法为区块链技术. 区块链 (Blockchain) 是比特币的一个重要概念, 是一串使用密码学方法相关联产生的数据块, 每一个数据块中包含了过去十分钟内所有比特币网络交易的信息, 用于验证其信息的有效性 (防伪) 和生成下一个区块 [111]. Blockchain 技术因其特有的序列生成方式, 有限的序列组合, 从而具有很好的加密特性和货币属性. 在能源网络向能源互联网演进的过程中, 如何实现可信交易, 可追踪的能源生成、传输、交换、消费等全生命周期的追踪和管理, Blockchain 将起到重要的作用. 区块链技术将实现能源全生命周期的可信、可追踪, 并在此基础之上产生可信的交换及交易.

5 能源互联网的发展展望

在互联网技术、计算机技术、通信技术和电力电子技术等不断革新、进步的背景下, 能源互联网将激发能源生产、传输、存储、消费等能源全价值链的变革, 将形成集中式与分布式协调发展、相辅相成的能源供应模式; 将对能量流赋予信息属性, 实现信息流对能量流的灵活管控. 能源互联网有望成

为第三次工业革命的决定性推动力量, 从而提高可再生能源比重, 促进化石能源清洁高效利用, 提升能源综合效率, 推动能源市场开放和产业升级, 形成新的经济增长点, 提升能源国际合作水平.

能源互联网可以借鉴互联网的发展历程. 从电信网由一种中心控制型的网络, 一个主导提供商为各个用户提供服务, 演变成现在互联网基础设施. 整个过程是将一个大一统的网络碎片化, 消费者广泛介入的过程, 移动互联网的爆发式发展更加体现了智能手机的发展和消费者介入的效应. 随着太阳能发电、电动汽车等分布式能源技术的发展, 消费者必将广泛深度介入能源网络运营, 能源互联网经过一个拐点后将会加速度发展.

但能源互联网不能简单套用互联网的概念, 照搬互联网的实现方式, 因为能源的传输与信息的传输差异巨大. 举例来说, 信息传输的过程中会有信号的衰减, 需要通过使用能源的信号放大器进行增益, 也就是说信息的传输要消耗能源. 能源的传输过程中会有能源的损耗, 由于能量守恒定律的限制, 没有 "能源放大器" 去补充这些损耗, 这就需要采用分布式能源等方式减少能源的传输, 缩短能源传输的距离, 或者研究如超导技术这样无损的能源传输方式.

能源互联网是一个全新的系统, 本质上是一个物质、能量与信息深度耦合的系统, 是物理空间、能量空间、信息空间乃至社会空间耦合的多域、多层次关联, 包含连续动态行为、离散动态行为和混沌有意识行为的复杂系统, 表现出混杂多尺度动态与复杂网络特性, 具有更广阔的开放性和更大的系统复杂性. 因此, 需要对能源互联网的物理架构、体系结构、标准协议、协同控制方法等关键基础理论问题进行深入研究, 揭示能源互联网的控制、运行和演化机理, 研究能源互联网的信息能源融合机制, 提出面向可靠性、安全性、自愈性等目标的能源互联网体系结构设计与优化技术, 形成相应的基础理论和关键技术创新.

6 结论

能源互联网是以互联网的理念构建的新型信息与能源高度融合的网络, 是以电力网络为基础架构, 协同了冷、热、气等多种能源所形成的智慧网络. 发展能源互联网将从根本上改变对传统能源利用模式的依赖, 是对人类社会生活方式的一次根本性革命. 本文在分析能源互联网研究背景的基础上, 初步提炼了能源互联网的形态与特征, 认为能源互联网可以分为三个层级, (1) 物理基础: 多能协同能源网络, (2) 实现手段: 信息物理能源系统, (3) 价值实现: 创新模式能源运营; 具备六大特征: 能源协同化、能源高效化、能源商品化、能源众在化、能源虚拟化、能源信息化. 进而梳理了国内外能源互联网的发展动态与现状. 接着, 探讨了能源互联网需重点开展研究的科学问题, 主要包括多能协同能源网络关键技术、信息物理能源系统关键技术和创新模式能源运营关键技术. 最后, 结合我国相关能源政策和技术的发展方向, 对能源互联网的实现探索进行了展望, 能源互联网有望成为第三次工业革命的决定性推动力量.

参考文献

1 José G. World Energy Assessment: Energy and the Challenge of Sustainability. New York: United Nations, 2000
2 Jefferson M. Sustainable energy development: performance and prospects. Renew Energ, 2006, 31: 571–582
3 Rifkin J. Third Industrial Revolution: How Lateral Power Is Transforming Energy, the Economy, and the World. New York: Palgrave Macmillan Trade, 2011. 33–72
4 Bolla R, Bruschi R, Davoli F, et al. Energy efficiency in the future Internet: a survey of existing approaches and trends in energy-aware fixed network infrastructures. IEEE Commun Surv Tut, 2011, 13: 223–244

5 Bui N, Castellani A P, Casari P, et al. The internet of energy: a web-enabled smart grid system. IEEE Network, 2012, 26: 39–45

6 Rifkin J. The third industrial revolution: how lateral power is transforming energy, the economy, and the world. Survival, 2012, 2: 67–68

7 Lanzisera S, Weber A R, Liao A, et al. Communicating power supplies: bringing the Internet to the ubiquitous energy gateways of electronic devices. IEEE Int Thing J, 2014, 1: 153–160

8 Sun H B, Guo Q L, Pan Z G, et al. Energy Internet: driving force, review and outlook. Pow Syst Technol, 2015, 39: 3005–3013 [孙宏斌, 郭庆来, 潘昭光, 等. 能源互联网: 驱动力、评述与展望. 电网技术, 2015, 39: 3005–3013]

9 Grid 2030: a national vision for electricity's second 100 years. Report. United State Department of Energy Office of Electric Transmission and Distribution, 2003

10 Sun H B, Guo Q L, Pan Z G. Energy Internet: concept, architecture and frontier outlook. Autom Electric Pow Syst, 2015, 19: 1–8 [孙宏斌, 郭庆来, 潘昭光. 能源互联网: 理念、架构与前沿展望. 电力系统自动化, 2015, 19: 1–8]

11 Duan Q, Sheng W X, Meng X L, et al. Research of energy sub grid for the future Energy Internet. Proc Chin Soc Electr Eng, 2016, 36: 388–398 [段青, 盛万兴, 孟晓丽, 等. 面向能源互联网的新型能源子网系统研究. 中国电机工程学报, 2016, 36: 388–398]

12 Zeng M, Zhang X C, Wang L H. Energy supply side reform promoting based on Energy Internet thinking. Electric Pow Constr, 2016, 37: 10–15 [曾鸣, 张晓春, 王丽华. 以能源互联网思维推动能源供给侧改革. 电力建设, 2016, 37: 10–15]

13 Yao J G, Gao Z Y, Yang S C. Understanding and prospects of Energy Internet. Autom Electric Pow Syst, 2015, 39: 9–14 [姚建国, 高志远, 杨胜春. 能源互联网的认识和展望. 电力系统自动化, 2015, 39: 9–14]

14 Yu X D, Xu X D, Chen S Y, et al. A brief review to integrated energy system and Energy Internet. Trans China Electrotechnical Soc, 2016, 31: 1–13 [余晓丹, 徐宪东, 陈硕翼, 等. 综合能源系统与能源互联网简述. 电工技术学报, 2016, 31: 1–13]

15 Gao F. Consideration and exploration of the Energy Internet. Electrical Industry, 2015, 11: 53–55 [高峰. 能源互联网思考与探索. 电器工业, 2015, 11: 53–55]

16 Quelhas A, Mccalley J D. A multiperiod generalized network flow model of the U. S. integrated energy system: part I-model description. IEEE Trans Pow Syst, 2007, 22: 829–836

17 Gu W, Wu Z, Bo R, et al. Modeling, planning and optimal energy management of combined cooling, heating and power microgrid: a review. Int J Electr Pow Energ Syst, 2014, 54: 26–37

18 Farhangi H. The path of the smart grid. IEEE Pow Energ Mag, 2010, 8: 18–28

19 Baheti R, Gill H. Cyber-physical systems. Impact Contr Technol, 2011, 13: 1–6

20 Rajkumar R, Lee I, Sha L, et al. Cyber-physical systems: the next computing revolution. In: Proceedings of the 47th Design Automation Conference, Anaheim, 2010. 731–736

21 Kim K D, Kumar P R. Cyber–physical systems: a perspective at the centennial. Proc IEEE, 2012, 100: 1287–1308

22 Ci S. Energy informatization and Internet-based management and its applications in distributed energy storage system. Proc Chin Soc Electr Eng, 2015, 35: 3643–3648 [慈松. 能量信息化和互联网化管控技术及其在分布式电池储能系统中的应用. 中国电机工程学报, 2015, 35: 3643–3648]

23 Building the Energy Internet. Report. The Economist, 2004

24 Federation of German Industries (BDI). Internet of Energy: ICT for Energy Markets of the Future. Berlin: Federation of German Industries Publication, 2008

25 Schmeck H, Karg L. E-Ernergy — paving the way for an Internet of energy. Inform Technol, 2010, 52: 55–57

26 Goerdeler A. E-Energy-Deutschlands Weg zum Internet der Energie. Heidelberg: Springer-Verlag, 2012

27 E-Energy. Federal ministry of economics and energy of Germany, 2013. http://www.e-energy.de/en/index.php

28 Ili'C D, Karnouskos S, Silva P G D, et al. A system for enabling facility management to achieve deterministic energy behavior in the smart grid era. In: Proceedings of the International Conference on Smart Grids and Green IT Systems, Barcelona, 2014. 170–178

29 European Commission. Mission growth: europe at the lead of the new industrial revolution. Report. 2013

30 Geidl M, Favre-Perrod P, Klöckl B, et al. A greenfield approach for future power systems. In: Proceedings of the 41st International Conference on Large Electric Systems, Paris, 2006

31 Geidl M, Koeppel G, Favre-Perrod P, et al. Energy hubs for the future. Pow Energ Mag, 2007, 5: 24–30

32 Parisio A, Vecchio C D, Vaccaro A. A robust optimization approach to energy hub management. Int J Electr Pow Energ Syst, 2012, 42: 98–104

33 Shen Z, Liu Z M, Baran M. Power management strategies for the green hub. In: Proceedings of the 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, 2012. 1–4

34 Real A J D, Arce A, Bordons C. Combined environmental and economic dispatch of smart grids using distributed model predictive control. Int J Electr Pow Energ Syst, 2014, 54: 65–76

35 Huang A Q. FREEDM system-a vision for the future grid. In: Proceedings of IEEE Power and Energy Society General Meeting, Minnesota, 2010

36 Akella R, Meng F, Ditch D, et al. Distributed power balancing for the FREEDM system. In: Proceedings of IEEE International Conference on Smart Grid Communications, Maryland, 2010. 7–12

37 Luna A, Lábaque M C, Zygadlo J A, et al. Intelligent energy management of the FREEDM System. In: Proceedings of IEEE Power and Energy Society General Meeting, Minnesota, 2010

38 Huang A Q, Crow M L, Heydt G T, et al. The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system: the Energy Internet. Proc IEEE, 2011, 99: 133–148

39 Karady G G, Huang A Q, Baran M, et al. FREEDM system: an electronic smart distribution grid for the future. In: Proceedings of Transmission and Distribution Conference and Exposition, Lacombe, 2012. 1–6

40 Boyd J. An Internet-inspired electricity grid. IEEE Spectrum, 2013, 50: 12–14

41 Abe R, Taoka H, Mcquilkin D. Digital grid: communicative electrical grids of the future. IEEE Trans Smart Grid, 2011, 2: 399–410

42 Zha Y B, Zhang T, Tan S R, et al. Understanding and thinking of the Energy Internet. Natl Def Sci Technol, 2012, 33: 1–6 [查亚兵, 张涛, 谭树人, 等. 关于能源互联网的认识与思考. 国防科技, 2012, 33: 1–6]

43 Directive opinions on promoting the development of the Internet+ Smart Energy. Report. 2016 [关于推进 “互联网+” 智慧能源发展的指导意见. 2016]

44 The Thirteenth Five-year Plan for the National Economic and Social Development of the People's Republic of China. 2015 [中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要. 2016]

45 Han Y D, Yu Y X, Huang Q L, et al. 2015 Report on the Development of China's Strategic Emerging Industries. Chapter 13. Chinese Academy of Engineering, 2015 [韩英铎, 余贻鑫, 黄其励, 等. 中国战略性新兴产业发展报告 2015. 第 13 章. 中国工程院, 2015]

46 Cao J W, Yang M B, Zhang D H, et al. Energy Internet — an infrastructure for Cyber-Energy integration. South Pow Syst Technol, 2014, 8: 1–10 [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. 南方电网技术, 2014, 8: 1–10]

47 Wang J Y, Meng K, Cao J W, et al. Information technology for Energy Internet: a survey. J Comput Res Dev, 2015, 52: 1109–1126 [王继业, 孟坤, 曹军威, 等. 能源互联网信息技术研究综述. 计算机研究与发展, 2015, 52: 1109–1126]

48 Ma Z, Zhou X X, Shang Y W, et al. Exploring the concept, key technologies and development model of Energy Internet. Pow Syst Technol, 2015, 39: 3014-3022 [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. 电网技术, 2015, 39: 3014–3022]

49 Zeng M, Yang Y Q, Liu D N, et al. "Generation-grid-load-storage" coordinative optimal operation mode of Energy Internet and key technologies. Pow Syst Technol, 2016, 40: 114–124 [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. 电网技术, 2016, 40: 114–124]

50 Liu J Z. Basic issues of the utilization of large-scale renewable power with high security and efficiency. Proc Chin Soc Electr Eng, 2013, 33: 1–8 [刘吉臻. 大规模新能源电力安全高效利用基础问题. 中国电机工程学报, 2013, 33: 1–8]

51 Xue Y S. Energy Internet or comprehensive energy network? J Mod Pow Syst Clean Energ, 2015, 3: 297–301

52 Dong Z Y, Zhao J H, Fu S, et al. From smart grid to Energy Internet: basic concept and research framework. Autom Electr Pow Syst, 2014, 38: 1–11 [董朝阳, 赵俊华, 福拴, 等. 从智能电网到能源互联网: 基本概念与研究框架. 电力系统自动化, 2014, 38: 1–11]

53 Liu Z Y. Global Energy Internet. Beijing: China Electric Power Press, 2015 [刘振亚. 全球能源互联网. 北京: 中国电力出版社, 2015]

54 Liu Z Y. Build the global Energy Internet, and promote the development of clean and green energy. State Grid, 2015,

6: 4–7 [刘振亚. 构建全球能源互联网, 推动能源清洁绿色发展. 国家电网, 2015, 6: 4–7]

55 Chen Q X, Liu D N, Lin J, et al. Business models and market mechanisms of Energy Internet (I). Pow Syst Technol, 2015, 39: 3050–3056 [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). 电网技术, 2015, 39: 3050–3056]

56 Liu D N, Zeng M, Huang R L, et al. Business models and market mechanisms of Energy Internet (II). Pow Syst Technol, 2015, 39: 3057–3063 [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). 电网技术, 2015, 39: 3057–3063]

57 Zhou H M, Liu G Y, Liu C Q. Study on the Energy Internet technology framework. Electr Pow, 2014, 47: 140–144 [周海明, 刘广一, 刘超群. 能源互联网技术框架研究. 中国电力, 2014, 47: 140–144]

58 Yang F, Bai C F, Zhang Y B. Research on the value and implementation framework of Energy Internet. Proc Chin Soc Electr Eng, 2015, 35: 3495–3502 [杨方, 白翠粉, 张义斌. 能源互联网的价值与实现架构研究. 中国电机工程学报, 2015, 35: 3495–3502]

59 Zhao H, Cai W, Wang J F, et al. An architecture design and topological model of intergrid. Trans China Electrotechnical Soc, 2015, 30: 30–36 [赵海, 蔡巍, 王进法, 等. 能源互联网架构设计与优化. 电工技术学报, 2015, 30: 30–36]

60 Cai W, Zhao H, Wang J F, et al. A unifying network of topological model of Energy Internet macro-scope structure. Proc Chin Soc Electr Eng, 2015, 35: 3503–3510 [蔡巍, 赵海, 王进法, 等. 能源互联网宏观结构的同一网络拓扑模型. 中国电机工程学报, 2015, 35: 3503–3510]

61 Zha Y B, Zhang T, Huang Z, et al. Analysis of Energy Internet key technologies. Sci Sin Inform, 2014, 44: 702–713 [查亚兵, 张涛, 黄卓, 等. 能源互联网关键技术分析. 中国科学: 信息科学, 2014, 44: 702–713]

62 Tian S M, Luan W P, Zhang D X, et al. Technical forms and key technologies on Energy Internet. Proc Chin Soc Electr Eng, 2015, 35: 3482–3494 [田世明, 栾文鹏, 张东霞, 等. 能源互联网技术形态与关键技术. 中国电机工程学报, 2015, 35: 3482–3494]

63 Yan T S, Cheng H Z, Zeng P L, et al. System architecture and key technologies of Energy Internet. Pow Syst Technol, 2016, 40: 105–113 [严太山, 程浩忠, 曾平良, 等. 能源互联网体系架构及关键技术. 电网技术, 2016, 40: 105–113]

64 Cheng F, Xu M F, Xu Z X, et al. Development of Energy Internet and key technology analysis. Electrotechnics Electr, 2015, 213: 1–3 [程帆, 徐鸣飞, 徐志翔, 等. 能源互联网发展及关键技术分析. 电工电气, 2015, 213: 1–3]

65 Zhou X X, Chen S Y, Lu Z X. Review and prospect for power system development and related technologies: a concept of three-generation power systems. Proc Chin Soc Electr Eng, 2013, 33: 1–11 [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. 中国电机工程学报, 2013, 33: 1–11]

66 Yan Y. The new electric distribution network in the Energy Internet. Electr Age, 2012: 39–40 [晏阳. 能源互联网下的新型配电网. 电气时代, 2012: 39–40]

67 Liu D C, Peng S C, Liao Q F, et al. Outlook of future integrated distribution system morphology orienting to Energy Internet. Pow Syst Technol. 2015, 39: 3023–3034 [刘涤尘, 彭思成, 廖清芬, 等. 面向能源互联网的未来综合配电系统形态展望. 电网技术, 2015, 39: 3023–3034]

68 MA Z, Zhou X X, Shang Y W, et al. Form and development trend of future distribution system. Proc Chin Soc Electr Eng, 2015, 35: 1289–1298 [马钊, 周孝信, 尚宇炜, 等. 未来配电系统形态及发展趋势. 中国电机工程学报, 2015, 35: 1289–1298]

69 Wang Y Z, Zhao B, Yuan Z C, et al. Study of the application of VSC-based DC technology in Energy Internet. Proc Chin Soc Electr Eng, 2015, 35: 3551–3560 [王一振, 赵彪, 袁志昌, 等. 柔性直流技术在能源互联网中的应用. 中国电机工程学报, 2015, 35: 3551–3560]

70 Yu S H, Sun Y, Niu X N, et al. Energy Internet system based on distributed renewable energy generation. Electr Pow Autom Eq, 2010, 30: 104–108 [于慎航, 孙莹, 牛晓娜, 等. 基于分布式可再生能源发电的能源互联网系统. 电力自动化设备, 2010, 30: 104–108]

71 Zhang T, Zhang F X, Zhang Y. Study on energy management system of Energy Internet. Pow Syst Technol, 2016, 40: 146–155 [张涛, 张福兴, 张彦. 面向能源互联网的能量管理系统研究. 电网技术, 2016, 40: 146–155]

72 Cao J W, Wang J Y, Ming Y Y, et al. Software-defined information and communication technology for Energy Internet. Proc Chin Soc Electr Eng, 2015, 35: 3649–3655 [曹军威, 王继业, 明阳阳, 等. 软件定义的能源互联网信息通信技术研究. 中国电机工程学报, 2015, 35: 3649–3655]

73 Ma J H, Zhang D X, Liu Y D, et al. Study on standard framework of Energy Internet. Pow Syst Technol, 2015, 39: 3035–3039 [马君华, 张东霞, 刘永东, 等. 能源互联网标准体系研究. 电网技术, 2015, 39: 3035–3039]

74 Alario-Franco M A. High temperature superconducting materials. Adv Mater, 2004, 7: 229–232

75 Chu C W. High-temperature superconducting materials: a decade of impressive advancement of Tc. IEEE Trans Appl Supercon, 1997, 7: 80–89

76 Zhang Q C, Callanan R, Das M K, et al. SiC power devices for microgrids. IEEE Trans Pow Electr, 2010, 25: 2889–2896

77 Qian Z M, Zhang J M, Sheng K. Status and development of power semiconductor devices and its applications. Proc Chin Soc Electr Eng, 2014, 34: 5149-5161 [钱照明, 张军明, 盛况. 电力电子器件及其应用的现状和发展. 中国电机工程学报, 2014, 34: 5149–5161]

78 Tamaki T, Walden G G, Sui Y, et al. Optimization of on-State and switching performances for 15–20-kV 4H-SiC IGBTs. IEEE Trans Electr Dev, 2008, 55: 1920–1927

79 Peftitsis D, Tolstoy G, Antonopoulos A, et al. High-power modular multilevel converters with SiC JFETs. IEEE Trans Pow Electr, 2012, 27: 2148–2155

80 Palmour J W, Zhang J Q, Das M K, et al. SiC power devices for smart grid systems. In: Proceedings of the 9th International Power Electronics Conference, Sapporo, 2010. 1006–1013

81 Cao J W, Meng K, Wang J Y, et al. An Energy Internet and energy routers. Sci Sin Inform, 2014, 44: 714–727 [曹军威, 孟坤, 王继业, 等. 能源互联网与能源路由器. 中国科学: 信息科学, 2014, 44: 714–727]

82 Cao Y, Yuan L Q, Zhu S M, et al. Parameter design of energy router orienting Energy Internet. Pow Syst Technol, 2015, 39: 3094–3101 [曹阳, 袁立强, 朱少敏, 等. 面向能源互联网的配网能量路由器关键参数设计. 电网技术, 2015, 39: 3094–3101]

83 Yi P, Zhu T, Jiang B, et al. Deploying energy router in an Energy Internet based electric vehicles. IEEE Trans Veh Technol, 2016, 65: 1

84 Kapoor R, Shukla A, Demetriades G. State of art of power electronics in circuit breaker technology. In: Proceedings of IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Raleigh, 2012. 615–622

85 Wim V D M, Mouton T. Solid-state transformer topology selection. In: Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Technology, Churchill, 2009. 1–6

86 Chen G, Hao M, Xu Z Q, et al. Review of high voltage direct current cables. J Pow Energ Syst, 2015, 1: 9–21

87 Flourentzou N, Agelidis V G, Demetriades G D. VSC-based HVDC power transmission systems: an overview. IEEE Trans Pow Electr, 2009, 24: 592–602

88 Tang G F, He Z Y, Pang H, et al. Basic topology and key devices of the five-terminal DC grid. J Pow Energ Syst, 2015, 1: 22–35

89 Fisher T M, Farley K B, Gao Y, et al. Electric vehicle wireless charging technology: a state-of-the-art review of magnetic coupling systems. Wirel Pow Transf, 2014, 1: 87–96

90 Kalwar K A, Aamir M, Mekhilef S. Inductively coupled power transfer (ICPT) for electric vehicle charging-a review. Renew Sustain Energ Rev, 2015, 47: 462–475

91 Ci S, Li H J, Chen X, et al. The cornerstone of Energy Internet: research and practice of distributed energy storage technology. Sci Sin Inform, 2014, 44: 762–773 [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. 中国科学: 信息科学, 2014, 44: 762–773]

92 Ribeiro P F, Johnson B K, Crow M L, et al. Energy storage systems for advanced power applications. Proc IEEE, 2001, 89: 1744–1756

93 Luo X, Wang J H, Dooner M, et al. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. Appl Energ, 2015, 137: 511–536

94 Luo N, Li J L. Research progress of energy storage technology in power system. Pow Syst Clean Energ, 2012, 28: 71–79 [骆妮, 李建林. 储能技术在电力系统中的研究进展. 电网与清洁能源, 2012, 28: 71–79]

95 Kempton W, Tomić J. Vehicle-to-grid power fundamentals: calculating capacity and net revenue. J Pow Sources, 2005, 144: 268–279

96 Kempton W, Tomić J. Vehicle-to-grid power implementation: from stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy. J Pow Sources, 2005, 144: 280–294

97 Jia Y Y, Ramachandaramurthy V K, Kang M T, et al. A review on the state-of-the-art technologies of electric

vehicle, its impacts and prospects. Renew Sustain Energ Rev, 2015, 49: 365–385
98 Seta P L, Lerch E. Strategies for the interconnection of off-shore power systems to shore using AC or DC. In: Proceedings of International Conference on Power System Technology, Zhejiang, 2010. 1–6
99 Ruiz N, Cobelo I, Oyarzabal J. A direct load control model for virtual power plant management. IEEE Trans Pow Syst, 2009, 24: 959–966
100 Pandžić H, Kuzle I, Capuder T. Virtual power plant mid-term dispatch optimization. Appl Energ, 2013, 101: 134–141
101 Pan Z, Guo Q, Sun H. Interactions of district electricity and heating systems considering time-scale characteristics based on quasi-steady multi-energy flow. Appl Energ, 2015, 167: 230–243
102 Xu X, Jia H J, Chiang H D, et al. Dynamic modeling and interaction of hybrid natural gas and electricity supply system in microgrid. IEEE Trans Pow Syst, 2014, 30: 1–10
103 Siano P. Demand response and smart grids — a survey. Renew Sustain Energ Rev, 2014, 30: 461–478
104 Albadi M H, El-Saadany E F. A summary of demand response in electricity markets. Electric Power Syst Res, 2008, 78: 1989–1996
105 Vivien M. Biology: the big challenges of big data. Nature, 2013, 498: 255–60
106 Naimi A I, Westreich D J. Big data: a revolution that will transform how we live, work, and think. Inform Commun Soc, 2013, 17: 181–183
107 Chen M, Mao S W, Liu Y H. Big data: a survey. Mobile Netw Appl, 2014, 19: 171–209
108 Cao J W, Yuan Z D, Ming Y Y, et al. Survey of big data analysis technology for Energy Internet. South Pow Syst Technol, 2015, 9: 1–12 [曹军威, 袁仲达, 明阳阳, 等. 能源互联网大数据分析技术综述. 南方电网技术, 2015, 9: 1–12]
109 Zhang D X, Miao X, Liu L P, et al. Research on development strategy for smart grid big data. Proc Chin Soc Electr Eng, 2015, 35: 2–12 [张东霞, 苗新, 刘丽平, 等. 智能电网大数据技术发展研究. 中国电机工程学报, 2015, 35: 2–12]
110 Huang Y H, Zhou X X. Knowledge model for electric power big data based on ontology and semantic web. J Pow Energ Syst, 2015, 1: 19–27
111 Swan M. Blockchain : blueprint for a new economy. Sebastopol: O'Reilly, 2015

Development status and prospects of the Energy Internet

Xiaoxin ZHOU, Rong ZENG*, Feng GAO* & Lu QU

Energy Internet Innovation Research Institute, Tsinghua University, Beijing 100084*, China*
* Corresponding author. E-mail: zengrong@tsinghua.edu.cn, fgao@tsinghua.edu.cn

Abstract The Energy Internet is a new energy ecosystem based on electricity with high penetration of renewable energy, high synergy of multiple energy types, high synergy of energy value chains from supply to demand and from planning to operation, and high participation of stakeholders. In this paper, we discuss the background and significance, basic connotation, dynamic development, current domestic and foreign status, scientific issues, and future development of the Energy Internet. The Energy Internet is based on the fusion of Internet Thinking, advanced information technology, energy industry, synergistic energy network, cyber-physical energy system, and innovative energy business models. It supports the energy revolution in achieving green, coordinated, and efficient development and drives the economic growth.

Keywords Internet plus, energy revolution, Energy Internet, multi-energy cooperation, cyber-physical systems

Xiaoxin ZHOU was born in 1940. He graduated from Tsinghua University, Beijing, in 1965. Currently, he is a senior researcher and professor at the China Electric Power Research Institute. His research interests include power system analysis, simulation, and control; flexible AC transmission systems; new generation of power and energy systems; and the Energy Internet. He is a member of the Chinese Academy of Sciences, honorary president of the China Electric Power Research Institute, and IEEE and CSEE fellow.

Feng GAO was born in 1977. He received his B.S. and M.S. degrees from Tsinghua University, China, and his Ph.D. from University of Washington, Seattle, USA. Currently, he is executive deputy director and distinguished research fellow of the Energy Internet Research Institute at Tsinghua University, where he leads the research and development with respect to the policies, technologies, standards, and industrialization of the Energy Internet.

Rong ZENG was born in 1971. He received his Ph.D. degree in electrical engineering from Tsinghua University, Beijing, in 1999. Currently, he is a professor, head of the Department of Electrical Engineering, and dean of the Energy Internet Research Institute of the Tsinghua University in Beijing. His research focuses on the electromagnetic transient and its protection with respect to ultra-high voltage AC/DC transmission, electromagnetic environment and measurements, and the DC power grid and its key equipment. He is an IET fellow, member of CIGRE SC C3, secretary general of WG C4.26, and member of the IEC TC 22/WG 19.

Lu QU was born in 1987. He received his Ph.D. degree in electrical engineering from the University of the Chinese Academy of Sciences, Hefei, in 2016. Currently, he is a postdoctoral researcher at Tsinghua University. His research interests include DC breaking technology, DC current limiting technology and AC/DC micro grid technology.