

能源互联网:理念、架构与前沿展望

孙宏斌^{1,2}, 郭庆来^{1,2}, 潘昭光^{1,2}

(1. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京市 100084;

2. 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, 北京市 100084)

摘要: 能源互联网是当前国际学术界和产业界关注的新焦点,其概念还处于讨论和不断发展中。文中从能源网和互联网的关系入手,分析了两者优先发展的互助发展历程及形成的不同理念和特点,在此基础上提出了能源互联网的发展目标、主要理念、主要特征和基本架构,并展望了潜在的前沿问题,以及和智能电网概念的关系。能源互联网是能源和互联网深度融合的新型能源系统,开放是其最核心理念,互联网思维和技术深度融合是其关键特征。能源互联网的基本架构由“能源系统的类互联网化”和“互联网+”两层组成。前者指能量系统,是互联网思维对现有能源系统的改造,表现为多能源开放互联、能量自由传输和开放对等接入;后者指信息系统,是信息互联网在能源系统的融入,体现在能源物联、能源管理和能源互联网市场等方面,是能源互联网的“操作系统”。

关键词: 能源互联网; 开放; 类互联网化; 互联网+

0 引言

能源为人类生活与生产提供能量来源,每一次工业革命都离不开能源类型和使用方式的革新。近年来,中国能源行业取得了令世人瞩目的成就,但也面临严峻挑战。在发电侧,可再生能源发展迅速,目前风电装机世界第一,但消纳问题十分突出,2015 年第一季度全国风电平均弃风率 18.6%^[1],实现 2030 年二氧化碳排放达峰的目标任重道远。在用能侧,2011 年中国单位 GDP 是世界平均水平的 2.5 倍^[2],能源利用效率直接制约了中国的经济转型,进一步提高能效迫在眉睫。随着中央提出通过能源革命还原其商品属性^[3],能源市场化稳步推进^[4],能源的生产、消费和体制将发生巨大变革,去中心化的分布式能源和新出现的产消者,将对现有能源生产、传输、消费、管理等模式产生巨大冲击。此外能源安全、环境污染、气候变化、社会发展等都对能源系统提出了新要求,亟需改造升级现有能源系统以应对上述挑战。

从近 5 至 10 年的发展来看,快速发展的互联网不仅深刻改变了人们的生活和工作方式,也改造和颠覆着诸多传统行业,如零售、批发、通信、教育、金

融等。随着李克强总理提出“互联网+”行动计划^[5],如何利用先进的互联网思维和技术来改造传统能源工业,引起了能源和信息行业的普遍关注。

能源互联网正是能源和互联网深度融合的产物,已经成为当前国际学术界和产业界关注的新焦点,也是能源行业继智能电网后又一前沿发展方向和重要课题。国际上前期已经率先开展了以“能源互联网”为主题的相关研究。2008 年美国国家科学基金资助了 FREEDM 项目^[6],提出建设 Energy Internet,并成立了研究中心。同年德国联邦经济技术部与环境部发起了 E-Energy 项目^[7],提出建设 Internet of Energy,并且实施了 6 个示范项目。2011 年里夫金的《第三次工业革命》^[8]将能源互联网作为第三次工业革命的核心之一,产生了广泛影响。2012 年开始,国内开展了一系列关于能源互联网的讨论和初步研究^[9-17],中国工程科技发展战略研究院将能源互联网列入中国战略性新兴产业^[18],国家电网提出了全球能源互联网构想^[19],清华大学成立了能源互联网创新研究院^[20]。2015 年 4 月 21—23 日,香山科学会议以“能源互联网:前沿科学问题与关键技术”作为主题召开了第 523 次学术讨论会^[21]。

在能源革命、“互联网+”和创新驱动等国家战略的背景下,产业界已经掀起能源互联网发展的浪潮。能源互联网作为具有重大影响的新生事物,其概念、特征、架构、前沿课题等关键问题还在讨论和

收稿日期: 2015-07-01; 修回日期: 2015-08-14。

国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2013CB228203);国家自然科学基金委创新研究群体资助项目(51321005);国家自然科学基金资助项目(51537006)。

发展中,学术界和工业界、能源领域和信息领域、技术专家和经济专家都对这个问题发表了很多真知灼见,体现了“百家争鸣”的良好研讨态势。文献[9]给出的能源互联网定义是“能源互联网是以电力系统为核心,以互联网及其他前沿信息技术为基础,以分布式可再生能源为主要一次能源,与天然气网络、交通网络等其他系统紧密耦合而形成的复杂多网流系统”。文献[10,22]等分析了能源互联网的内涵和关键技术。文献[14,23]从信息角度分析了能源互联网对信息技术的要求和热点问题。文献[12-13,16,24-26]等讨论并介绍了能源互联网的若干理念和关键技术,包括微电子技术、储能技术、需求侧响应等。

笔者发起并组织召开了能源互联网香山科学会议^[21],与多位跨领域、跨学科专家进行了深刻的思维碰撞和观点研讨,在对现有概念梳理和研究的基础上,通过本文进一步整理了笔者所理解的能源互联网概念和架构,希望能够有助于业界对能源互联网的理解,形成合力,促进能源互联网的健康发展。

1 能源网和互联网

1.1 能源网和互联网的互助发展

以电网为代表,能源网和互联网相互学习和相互借鉴的发展历程如图1所示。

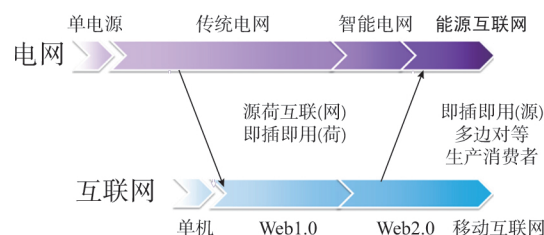


图1 电网和互联网的互助发展历程
Fig.1 Mutual-learning development between electric grid and the Internet

当互联网在20世纪六七十年代出现时,电网的发展已相当成熟。庞大的电网将众多的源荷连接起来,用户在任何地方只要能接入电网,就可以便捷地获取电能,不需要知道电能来自哪里。互联网刚出现时借鉴了电网的理念,实现了不同计算机之间的互联,以及作为信息的接收端(客户)的即插即用和使用的透明。发展初期,互联网也是由少数大型服务器和众多客户端组成,类似于电网中少数大电源对应众多负荷。之后电网和互联网都在不断发展,实现了更广范围的互联,取得了巨大的互联效益。

发展到今天,互联网已将触角遍及全球各个角落,用户可以随时随地接入互联网获取需要的信息,并由单向发布的Web1.0时代进入了双向互动的

Web2.0时代,移动互联网也得到迅速发展,信息的实时共享成为可能。同时,互联网从集中式走向分布式,每个个体既是信息的消费者,也是信息的生产者,而且实现了异种设备的即插即用,具备了自组织、自愈等功能。此外,互联网的发展带来了即时通信、电子商务、在线教育、互联网金融等新业态,也带来了长尾、众包和O2O,B2C,C2B等商业新模式,深刻改变着人们的生活和工作方式,互联网已成为当前最活跃的创新创业之土壤。

而相比之下,近三四十年来,电网的发展相对缓慢,尽管出现了智能电网等新概念和技术,但电网保守内向和自然垄断的局面并未发生实质性变化,大众创新创业的活力明显不足。随着可再生能源、分布式发电技术的迅速发展,现有的电网越来越难以满足人们对能源民主化、高效化和绿色化方面的高要求。因此,电网亟需从互联网的成功中汲取最新最先进的理念和技术,实现电网的升级进化。在此背景下,以电为核心的能源网和互联网深度融合将催生能源互联网。

1.2 能源网和互联网的理念对比

互联网能够取得如此快速的发展并具有众多优点,离不开若干重要理念的支撑,如开放、互联、以用户为中心、分享、对等、透明、轻资产化等。

在众多互联网理念中,开放是其最核心的理念。开放使得互联网能够打破诸多壁垒,实现各种异构系统的互联和所有源荷的平等接入,从而迅速发展形成全球互联的平台,进而产生巨大的互联价值,使得信息的实时交互、分享和协同等成为可能,也使零边际成本成为趋势。同时,互联还使得海量的用户成为主体,对等、透明和分布等理念也由此发展出来,在商业中进而产生以用户为中心的理念,用户体验至上,使得互联网能够在与众多传统行业的融合中取得巨大成功,催生出许多新的业态和商业模式。此外,互联也产生了大数据,为数据驱动的分析和决策提供了基础。总之,开放促进了互联,互联创造了价值,价值缔造了互联网的成功。

相比之下,能源网的理念则显得相对保守和内向。传统的能源网理念是追求大系统、集中式的发展,不断提高机组容量、电压等级、网络规模等,在获得巨大规模效益的同时,也加强了垄断。同时,为了保证系统的可靠性,系统相对保守。此外,不同类型的能源网之间相互割裂,阻碍了综合能效的提高。

但是,随着可再生能源和分布式发电技术的快速发展,规模效应在局部可能不再成立,在很多情形下分布式可能带来更高的能效和可靠性,用户正在成为数量巨大的能源生产者。与此同时,可再生能

源的随机性对系统的安全运行带来了挑战,使得需求侧响应和能源的分享显得前所未有的重要。此外,多类能源的互联可以有效提高综合能效,也有助于可再生能源的消纳。因此,迫切需要在能源网中解放思想,引入互联网开放互联的理念。

1.3 能源网和互联网的特点

能源网和互联网具有相似的结构,都是通过网路将不同能源(或信息)的生产者和消费者连接起来并传输能量(或信息),覆盖广域的空间。但现有的能源网和互联网有诸多差别,具体如表1所示。

表1 能源网和互联网的特点比较
Table 1 Feature comparison between energy network and the Internet

特点	能源网	互联网
开放性	低	高
传输内容	能源	信息
传输规律	能源传输规律(基尔霍夫电流定律(KCL)、基尔霍夫电压定律(KVL)等)	信息传输规律(信息论等)
流量控制	不灵活,难以选择传输路径和端对端传输	灵活,可以选择传输路径和端对端传输
损耗	损耗较大	损耗很小或无损耗(可恢复)
流动方向	单向为主	双向
可复制性	不可复制	可复制
存储能力	弱	强
便捷性	一般	高
自愈能力	弱	强
边际成本	高	低
无线技术	低	高
用户主动程度	低	高
分布式	低	高
平等性	低	高
即插即用水平	一般	高

能源网和互联网区别的物理基础是能源和信息的区别,即物理规律无法改变。此外,能源网相比于互联网最大的差距在于开放性差导致互联程度低,主要表现在以下两个层面。

1)在物理层面,电、热、冷、气、油、交通等能源子系统存在行业壁垒,未能实现开放互联;其次,能源网中能量的传输也无法像互联网中信息传输一样灵活可控。这导致能源网总能效不高,可再生能源的消纳受限,同时使得能源生产和消费的便捷性不足。

2)在商业层面,能源网仍被少数大型公司垄断,众多的源荷之间难以形成直接对接,大量的能源用户处于被动地位,无法以对等的身份参与到能源市场中,创新创业主体不多,市场不繁荣。

因此,亟需引入互联网理念和技术改造能源系统。通过建设能源互联网,推动能源市场化,使得能

源系统能够实现多能源的开放互联和能量自由传输,支撑各种电源、设备、系统的开放接入,允许各种参与者和海量用户的开放进入,构建开放的交易平台,形成良好的创新创业环境,实现以市场为主导的能源资源的优化配置。

2 能源互联网基本概念

能源互联网作为一个跨领域的前沿概念,其内涵在不断发展,难以给出所有人都认可的标准定义。事实上也没有必要给出确切的定义,就像智能电网概念一样,至今没有标准定义,但其核心内涵已经得到了学术界、产业界和社会的初步共识和认可。尽管难以给出定义,但仍有必要明确能源互联网的发展目标、理念、特征和基本架构,这对于促进相关学科和产业的发展具有重要意义。

2.1 发展目标

能源互联网的发展目标可以归纳为以下三点。

1)能源市场化:作为抓手,打破行业壁垒,推进能源市场化,促进能源领域的创新创业,重塑能源行业。基于信息互联网,能源互联网可以为各种参与者和大量用户提供开放平台,降低进入成本,便捷对接供需双方,使设备、能量、服务的交易更加便捷高效,实现多方共赢,激活大众的创业热情 and 创新能力,为能源革命提供持续动力。

2)能源高效化:能源互联网实现了多类能源的开放互联和调度优化,为能源的综合开发、梯级利用和能源共享提供了条件,可以大幅度提高能源的综合使用效率。

3)能源绿色化:能源互联网可以通过多种能源的耦合互补、各类储能的应用、需求侧响应等,支撑高渗透率可再生能源的接入和消纳。

2.2 主要理念

能源互联网在传统能源网基础上引入了互联网理念,具有以下新的内涵。

1)开放。开放是能源互联网核心理念,内涵丰富,主要体现在以下几点:多类型能源的开放互联、各种设备与系统的开放对等接入、各种参与者和终端用户的开放参与、开放的能源市场和交易平台、开放的能源创新创业环境、开放的能源互联网生态圈、开放的数据与标准等。

2)互联。互联是开放的重要表现,为能源的共享和交易提供平台,连接供需,是能源互联网创造价值的基础。互联包括多种能源形式、多类能源系统、多异构设备、各类参与者等的互联。

3)以用户为中心。以用户为中心是能源互联网在商业上取得成功的关键。用户的认可和广泛参

与,才能有效推动能源互联网在能源生产、运行、管理、消费、交易、服务等各环节创造价值。以用户为中心强调提供极致的用户体验,不但满足用户不同品位的便捷用能需求,还要满足用户便捷生产和交易能源的需求。

4) 分布式。分布式是推动能源互联网发展的重要动力。光伏等新能源适合分布式,用户也将成为分布式的能源产消者。在分布式条件下,为保证能源产消的即插即用和能量时时处处平衡,这对分布式优化和控制提出了高要求。

5) 共享。共享是能源互联网的精神,物理设备的开放互联如果缺少了共享的机制,也就无法形成有效的能源市场和良好的创新创业环境。

6) 对等。对等是能源互联网的形态之一,能源互联网需要打破垄断,去中心化,不同参与者之间处于对等的位置,在此基础上进行对等的交易。能源的生产和消费也是对等的,不再是单向的生产跟踪消费模式,而是双向甚至多边的。

2.3 主要特征

能源互联网的关键特征是互联网理念和技术的深度融入,至少表现为以下几点特征。

- 1) 支撑多类型能源的开放互联,提高能源综合使用效率。
- 2) 支撑高渗透可再生能源的接入和消纳。
- 3) 支撑能量自由传输和用户广泛接入的自由多边互联网架构。
- 4) 集中和分布相结合的自组织网络架构。
- 5) 支撑众筹众创的能源互联网市场和金融。
- 6) 支撑能源运行、维护、交易、金融等大数据分析。

2.4 基本架构

能源互联网的基本架构如图2所示,大致可分为“能源系统的类互联网化”和“互联网+”两层:前者指能量系统,是互联网思维对现有能源系统的改造;后者指信息系统,是信息互联网在能源系统的融入。具体介绍在下文展开,并讨论相关的前沿问题。

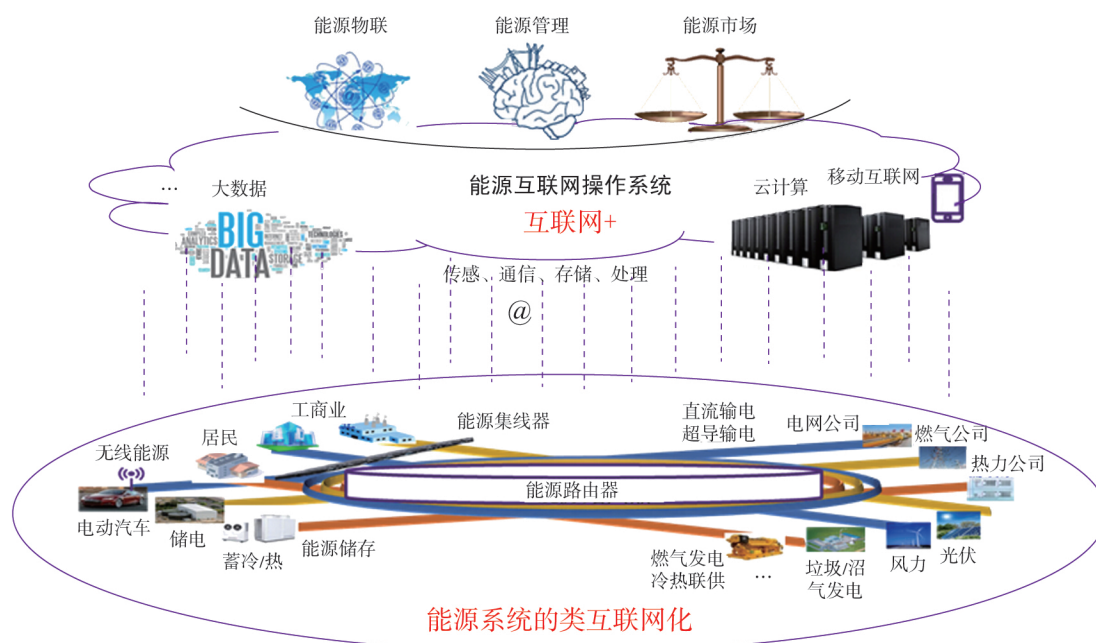


图2 能源互联网基本架构
Fig. 2 Basic architecture of Energy Internet

3 能源系统的类互联网化

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,其目的是使得能源系统具有类似于互联网的某些优点。能源系统的类互联网化主要表现为以下三点:多能源开放互联、能量自由传输和开放对等接入。

3.1 多能源开放互联

在传统能源系统中,供电、供热、供冷、供气、供油等不同能源行业相对封闭,互联程度有限,不同系统孤立规划和运行,不利于能效提高和可再生能源消纳。能源互联网需要打破这个壁垒,实现电、热、冷、气、油、交通等多能源综合利用,并接入风能、太阳能、潮汐能、地热能、生物能等多种可再生能源,形成开放互联的综合能源系统。如图3所示,在源端,

通过构建综合能源系统,利用多种能量形式之间的转化以及更为廉价和大容量的热储等技术,可显著提高可再生能源消纳水平,并平抑其波动;在用户端,通过构建综合能源系统,可有针对性地满足用户多品位的能量需求,在以用户为中心的前提下有效提高能源综合利用率;在传输网侧,多能源开放互联网可以减少网络建设,提高系统安全可靠水平。

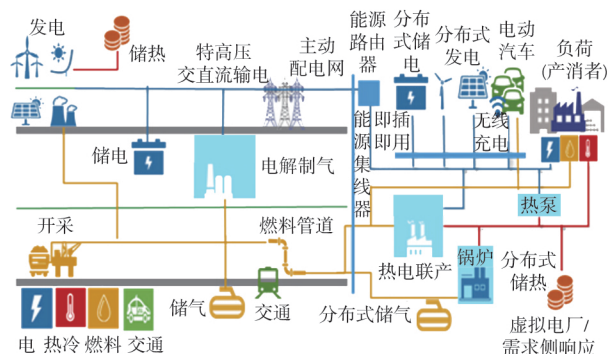


图3 多能源开放互联
Fig. 3 Multi-energy open integration

要实现多能源开放互联,离不开各种能源捕获和转换技术,包括风机、光伏、光热、冷热电三联供、热泵、吸收式制冷、电解制氢、电动汽车等技术,仍有大量新技术需不断完善,如低风速风机、新材料光伏、含热储的光热电站、微型燃料电池、电解制氢、电动汽车等。多能源开放互联使不同系统间的耦合增加,在规划层面需要综合考虑不同能源系统间的相互作用,以及储能、需求侧响应等的影响。

3.2 能量自由传输

类比信息自由传输的特点,能量的自由传输表现在以下几点:远距离低耗(甚至零耗)大容量传输、双向传输、端对端传输、选择路径传输、大容量低成本储能、无线电能传输等,如图4所示。

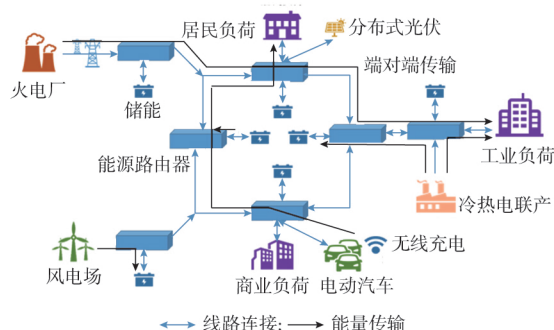


图4 能量自由传输
Fig. 4 Energy free transmission

能量的自由传输使得能量的控制更为灵活,储能的大量使用可使能源供需平衡更为简便,可以根

据需要选择能量传输的来源、路径和目的地,支持能量的端对端分享,支持无线方式随时随地获取能源等,进而可以促进新能源消纳和提高系统的安全可靠性。

借鉴互联网的理念,为了实现能量的自由传输,在设备级的前沿技术包括:能源互联网标准协议、能源路由器、能源集线器、多端直流、大容量低成本高效率储能、超导、无线能量传输等。由中国发起的ISO/IEC/IEEE 18880标准,又称为泛在绿色社区控制网络协议^[27]为能源互联网提供了一个标准协议,但更多的协议仍然需要制定。能源路由器是能源互联网中连接不同电压、频率网络的关键设备,满足不同电压、功率、电能质量的需求,并且可以隔离故障、支持即插即用等。FREEDM在能源路由器方面进行了原型开发和实验^[6],文献^[28]从信息视角进行了相关研究,日本则研究了可以实现电能分时打包传输、区分不同来源、选择传输路径和目的地的能源路由器^[29]。多端直流电网是实现新能源、直流负荷、储能系统等经济互联的有效方案,可以实现能量的多端灵活传输,但直流断路器、系统控制和保护等都还面临较大困难。无线电能传输可以用于植入体内医疗器械、电动汽车、消费类电子产品、空间太阳能电站等供电,尽管目前已经有了初步应用,但距离普及还有较大距离。

3.3 开放对等接入

如图5所示,在互联网中,不同设备可以开放对等接入,做到即插即用,使得用户的使用非常便捷,是互联网具有大量用户的基础。



图5 开放对等接入
Fig. 5 Open peer access

当前能源系统可以做到被动负荷的即插即用,而源(物理设备或者系统,如微网等)的即插即用仍未实现。分布式能源的安装、接入电网麻烦,开销的资金和时间成本都比较高。在能源互联网中,产消者将是能源交易和分享的主体,源的开放对等接入可为产消者的大量出现提供保障,形成规模,并支撑需求侧响应和虚拟电厂等各类应用。具体表现在:新的设备或者系统接入能源互联网时,无需人工报

装、审批和建模,而是可被自动感知和识别,进而被自动管理,也可以随时断开,具有良好的可扩展性和即插即用性。

能源设备的即插即用比信息的即插即用更加复杂,涉及能源和信息两个层面的协同。要实现即插即用,首先要能自动保障能源网络的安全稳定,此外还需研究以下内容:①能量和信息即插即用的标准接口和协议;②分布式设备的自组织管理,包括设备的自动感知和识别、设备模型的生成和拼接、自动通信、系统级的协同管理等;③设备自身实现自治控制,减少对系统的不利影响。能源路由器、能源集线器、微网、代理、集群、虚拟电厂等技术的发展为设备的即插即用提供有效手段,分层控制、分布式控制、对等控制等控制技术发展也将支撑开放对等接入。

4 互联网+

能源互联网是一个典型的“互联网+智慧能源”的应用场景,通过互联网技术将设备数据化,并将所有主体自由连接,进而打造能源互联网的“操作系统”,来统筹管理各种资源,产生显著区别于原有能源系统的业态和商业模式,促进大众创新创业。主要体现在以下三点:能源物联、能源管理和能源互联网市场。

4.1 能源物联

现有能源系统的传感通信存在以下两方面问题:一方面传感数据的类型较少,采集频率较低,对系统的感知有限;另一方面专网传输,不同系统间难以交互,不同参与者之间也难以交互,造成信息孤岛。利用物联网技术可以实现不同位置、不同设备、不同信息的实时广域感知和互联,在已有专网传输的基础上,新增开放传输系统,在不影响安全等前提下实现信息的最大化共享,提高系统感知、控制和响应能力。

能源互联网是一个典型的信息能源融合的开放系统,其关键技术包括信息物理系统建模与仿真、信息物理融合规划、信息安全等。对于能源互联网这样的复杂系统,建模的难点在于如何表征信息流与能量流之间的耦合关系,并在此基础上实现信息-物理相互影响的定量分析与评估。在规划层面,物理和信息的规划需要协同。在互联网环境下,信息安全问题更加突出,信息的传输与存储安全、用户隐私,以及人为恶意攻击等都可能影响整个系统的安全可靠性。

4.2 能源管理

能源系统的运行离不开能源管理。目前电、热、冷、油、气、交通不同类型的能源管理相对独立,不利于能源的综合利用和互补协同。而且目前的能源

管理都是相对封闭的集中式方法,无法适应大量参与者和产消者参与的情形。能源互联网的能源管理,一方面要实现不同能源类型的分布式协同管理,实现源、网、荷、储的实时互动和优化调度;另一方面需要借鉴互联网透明的理念 and 大数据、云计算、移动互联网等新技术,让用户体验到专业、便捷和定制化的服务。能源管理包括可再生能源管理、多能流能量管理、需求侧能效管理、在线教育及培训等,如图6所示。



图6 能源管理
Fig. 6 Energy management

能源互联网是一个多系统相互耦合的开放系统,包含多个领域的设备元件,具有异质性、随机性、多目标和多尺度等特点,系统特性复杂,需要开展相应研究,包括综合能源系统建模和仿真、多能流耦合的在线分析与运行控制等理论和技术,需要发展出多能流耦合的分布式能量管理系统。为了实现对用户的透明,大数据、云计算将是其技术支撑,用于新能源出力 and 负荷的预测、用户行为分析和建模、能耗分析等,为用户提供个性化的解决方案。

4.3 能源互联网市场

互联网允许大量产消者的参与和多边对接,为能源的自由交易和众筹金融提供平台,可产生新的商业模式和新业态。如图7所示,通过自洽自愈、竞争互补的市场机制,实现能源互联网各要素的共生共赢。

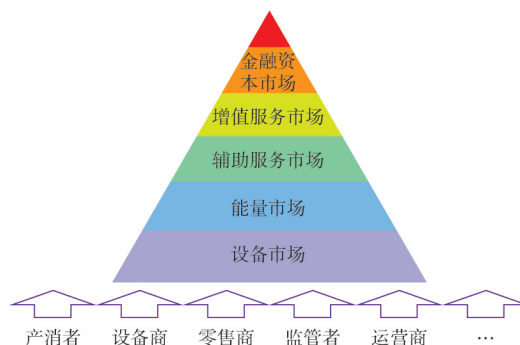


图7 能源互联网市场
Fig. 7 Market for Energy Internet

在能源互联网中,能源的生产者、服务者和消费者之间的界限将会消失,设备、能量和服务都可以进行自由交易,市场在能源生产和消费过程中的配置作用将更加凸显,存在以下潜在研究热点:能源互联网市场机制、市场行为、市场化环境下的安全可靠运行等。此外,与传统纵向一体的能源网运行不同,能源互联网呈现出自由多边的海量用户平等参与、消费者即生产者的新架构,其运行的复杂性呈现数量级增长。大数据和云计算等数据技术的引入,为以用户为中心构建能源互联网管理和商业模式提供了可能,可以开展以下研究:基于传感网络和大数据的能源互联网全面态势感知、基于云计算和软件定义网络的能源互联网运维与控制、基于大数据与互联网金融的能源互联网商业模式等。

5 能源互联网和智能电网的关系

智能电网是21世纪初提出并在近几年得到快速发展的重要概念^[30],是信息通信技术(ICT)与电网融合的产物。而能源互联网是互联网理念和技术与能源系统融合的产物,是对智能电网的发展和革新。

与智能电网相比,能源互联网更加开放、更多互联,表现在:①由主要关注单一的电力系统转向关注供电、供热、供冷、供气、电气化交通等综合能源系统,实现多种能源系统的开放互联;②由与ICT融合转向与互联网融合,利用互联网思维和技术,改造现有能源行业,形成新的商业模式和新业态,促进大众创新创业,其社会影响力和公众兴趣度远高于智能电网。

6 结语

能源互联网是能源和互联网深度融合的新型能源系统,已经成为当前国际学术界和产业界关注的新焦点,也是能源行业继智能电网后又一前沿发展方向和重要课题。本文从一个新视角总结了能源互联网的主要目标、理念、特征和基本架构,展望了潜在的前沿问题。其中,开放是其最核心的理念,互联网思维和技术深度融入是其关键特征,其基本架构由“能源系统的类互联网化”和“互联网+”两层组成。作为技术手段和抓手,能源互联网有助于促进能源的市场化、高效化和绿色化。

能源互联网作为跨学科、跨领域的新方向,其发展离不开多学科交叉和产学研的合作,并将呈现出开放发展的特点,出现新的形态和模式。相信通过国内外学者和社会各界的共同努力,能源互联网将会迎来美好的明天。

参考文献

- [1] 国家能源局. 一季度全国风电并网运行情况[EB/OL]. [2015-05-11]. http://www.nea.gov.cn/2015-04/28/c_134190553.htm.
- [2] U. S. E. I. Administration. Energy intensity-total primary energy consumption per dollar of GDP (Btu per year 2005 U. S. dollars (market exchange rates))[EB/OL]. [2015-05-11]. <http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/IEDIndex3.cfm?aid=92&pid=46&aid=2>.
- [3] 新华网. 习近平:积极推动我国能源生产和消费革命[EB/OL]. [2015-05-11]. http://news.xinhuanet.com/politics/2014-06/13/c_1111139161.htm.
- [4] 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[EB/OL]. [2015-05-11]. <http://www.chinapower.com.cn/newsarticle/1231/new1231828.asp>.
- [5] 李克强. 政府工作报告[R/OL]. [2015-05-11]. <http://lianghui.people.com.cn/2015npc/n/2015/0305/c394298-26642056.html>.
- [6] 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.
- [7] BLOCK C, BOMARIUS F, BRETSCHNEIDER P, et al. Internet of energy—ICT for energy markets of the future[R]. 2010.
- [8] RIFKIN J. Third industrial revolution: how lateral power is transforming energy, the economy, and the world[M]. Palgrave Macmillan Trade, 2011.
- [9] 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.
- [10] 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, 57(6): 702-713. ZHA Yabing, ZHANG Tao, HUANG Zhuo, et al. Analysis of energy internet key technologies[J]. Science China: Information Sciences, 2014, 57(6): 702-713.
- [11] 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.
- [12] 黄如,叶乐,廖怀林. 可再生能源互联网中的微电子技术[J]. 中国科学:信息科学, 2014, 57(6): 728-742. HUANG Ru, YE Le, LIAO Huailin. Microelectronics technologies in renewable energy internet[J]. Science China: Information Sciences, 2014, 57(6): 728-742.
- [13] 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, 57(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]. Science China: Information Sciences, 2014, 57(6): 762-773.
- [14] 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, 8(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, 8(4): 1-10.
- [15] 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, ZHA Yabing. Effects of the energy Internet on military energy transformation[J]. National Defense Science & Technology, 2014, 35(3): 1-5.
- [16] 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.
- [17] 韩董锋, 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.
- [18] 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.
- [19] 刘振亚. 全球能源互联网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [20] 清华大学成立能源互联网创新研究院. 推动我国能源互联网科技与产业发展[EB/OL]. [2015-04-24]. <http://news.tsinghua.edu.cn/publish/news/4204/2015/20150424150026263683500/20150424150026263683500.html>.
- [21] 清华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”研讨会在京召开[EB/OL]. [2015-05-11]. <http://news.tsinghua.edu.cn/publish/news/4205/2015/20150423102254556119671/20150423102254556119671.html>.
- [22] 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.
ZHA Yabing, ZHANG Tao, TAN Shuren, et al. Understanding and thinking of the energy internet[J]. National Defense Science and Technology, 2012, 33(5): 1-6.
- [23] 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).
WANG Jiye, MENG Kun, CAO Junwei, et al. Research on information technology for energy internet: a survey[J]. Journal of Computer Research and Development, 2015, 52(5).
- [24] 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 & Technology, 2014, 35(3): 14-19.
- [25] 晏阳. 能源互联网下的新型配电网[J]. 电气时代, 2012(10): 39-40.
- [26] XUE Y. Energy internet or comprehensive energy network? [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2015, 3(3): 297-301.
- [27] IEEE 18880—2015 ISO/IEC/IEEE information technology—ubiquitous green community control network protocol[S]. 2015.
- [28] 曹军威, 孟坤, 王继业, 等. 能源互联网与能源路由器[J]. 中国科学: 信息科学, 2014, 57(6): 714-727.
CAO Junwei, MENG Kun, WANG Jiye, et al. An energy internet and energy routers[J]. Science China: Information Sciences, 2014, 57(6): 714-727.
- [29] TAKAHASHI R, TASHIRO K, HIKIHARA T. Router for power packet distribution network: design and experimental verification[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2015, 6(2): 618-626.
- [30] Smart grid[EB/OL]. [2015-05-11]. <http://energy.gov/oe/services/technology-development/smart-grid>.

孙宏斌(1969—), 男, 通信作者, 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, 主要研究方向: 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, 主要研究方向: 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, 主要研究方向: 综合能源系统能量管理、需求侧响应。E-mail: panzg09@163.com

(编辑 章黎)

Energy Internet: Concept, Architecture and Frontier Outlook

SUN Hongbin^{1,2}, GUO Qinglai^{1,2}, PAN Zhaoguang^{1,2}

(1. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power System and Generation Equipments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The Energy Internet is a new focus of concern in current international academic and industrial areas, with the concept still under discussion and development. Beginning with the relation between the energy network and the Internet, this paper analyzes their development in learning from each other and the respective ideas and features formed. Then the development goals, main ideas, main features and basic architecture of the Energy Internet are proposed, followed by an exchange of opinions of potential frontier issues and relation with the smart grid. The Energy Internet is a new energy system that deeply integrates the energy system and the Internet, where openness is the key idea and deep integration of the Internet ideas and technologies is the key feature. The basic architecture of the Energy Internet consists of two levels, namely, “Internet-like energy system” and “Internet+”. The former refers to the energy system, or the reform of the existing energy system directed by the Internet ideas, represented by multi-energy open integration, energy’s free transmission and open peer access. The latter refers to the information system, or the integration of the Internet in the energy system. This is the “operating system” of the Energy Internet, covering the Energy Internet of things, energy management and Energy Internet market.

This work is supported by National Basic Research Program of China (973 Program) (No. 2013CB228203) and National Natural Science Foundation of China (No. 51321005, No. 51537006).

Key words: Energy Internet; openness; Internet-like; Internet+