

能源互联网的认识和展望

姚建国, 高志远, 杨胜春

(中国电力科学研究院(南京), 江苏省南京市 210003)

摘要: 能源互联网目前已经成为研究热点,但有关其理念、架构、技术、发展路径等诸多方面尚无定论。文中从互联网的发展经验出发,剖析能源互联网的实质和特征,辨析其与智能电网的区别与联系,梳理其关键支撑技术,提出了能源互联网的可能发展路径。指出能源互联网有广义和狭义 2 种含义,其发展依赖信息通信技术(ICT)、商业模式等 8 项关键技术和机制,未来的发展可以分为同时并存的自顶向下的广域全球能源互联网和自底向上的局域能源共享网络 2 种发展模式和路径。

关键词: 智能电网; 能源互联网; 能源互联; 信息通信技术; 可再生能源; 储能

0 引言

能源问题是支撑人类社会可持续发展的核心问题。然而全球的化石能源是有限的,不论采用什么技术,按目前的社会需求和开采强度,百年之内全球化石能源就将趋于枯竭^[1]。更何况化石能源的分布并不均衡,其使用对环境也会带来很大危害。可以预见,化石能源将逐渐不足以支撑人类社会的和谐发展,进入可再生能源时代是必然的。

对可再生能源,包括水能、风能、太阳能、生物能、海洋能、地热能等的开发和利用,已经经过了长期的努力,其基本形式是将其转化为电能以供传输和使用,但目前不论是对可再生能源的开发,还是电网对其的接纳利用都还面临着许多问题^[2],突出表现在能源开发的技术和成本,能源的传输,可再生能源本身的随机性、间歇性、波动性、反调峰特征,及其分布地域不均衡性等问题。这些都是目前可再生能源规模化使用需要应对和解决的问题。

互联网的繁荣发展和深刻影响,既是不争的事实,又带来了很多启示。在其发展过程中的一些经验和特征值得借鉴,特别是以下几点:①大众参与;②重机制、重标准、少干预;③以平台服务为基础,依托其上的应用是无限的;④衍生出众多的有效商业模式。如今的互联网已成为经济社会发展的重要基础。

当可再生能源开发与互联网应用深入结合时会发生什么? 众多学者都看好第三次工业革命和能源

互联网(以下简称 EI)。随着 2011 年美国学者杰里米·里夫金的《第三次工业革命》^[3]一书的出版,相关研究逐渐开始增多。本文对 EI 的理念、特征、关键技术进行了辨析,梳理了其发展现状和技术差距,分析和展望了中国的 EI 未来的发展路径。

1 EI 理念和架构的再认识

EI 随着可再生能源时代的到来应运而生。国际上对下一代能源网络的研究由来已久,近年来 EI 更是逐渐成为研究和实验热点,出现了众多的成果和原型系统,比较典型的有美国的未来可再生电能传输与管理系统(FREEDM)^[4],德国的基于信息通信技术(ICT)的智能化能源系统“E-Energy”计划及其试点建设^[5],日本的基于信息互联的数字电网^[6]等。中国各科研院所和企业也已从多个方面开展了相关研究和实践^[7-14],包括交直流混合主动配电网等基础支撑技术的研究^[11],能源路由器和电能交换器等支撑装备的实验室研发^[12-13],北京延庆的城市 EI 试点^[14]等,国家电网公司提出了全球 EI 战略^[1]。目前,虽然有关 EI 的研究和实验众多,但在其理念、架构、技术、关键设备、发展路径等方面也出现了分歧众多、适用范围各异的情况,需要深入探讨。

以互联网思维为基础的 EI 原始理念^[3]可以用图 1 来表示,其后的相关研究大多以此为基础。其要点在于:①建立能源共享网络;②能源以电能为基本形式,允许多种能源形式的互联互通和综合应用(基于电动汽车的智能交通就是一个典型应用);③海量用户接入该网络;④每个用户/应用都是该网

络的参与建设者,即同时具有能源消费者、储存者、提供者三重角色;⑤在能源共享平台基础上,存在类似互联网的商业机制,允许用户之间以及用户与平台之间进行灵活的能量交易;⑥该网络以分布式能源的利用和发展为目标。其发展思路是始于网络互联,建立能源共享平台,从而调动大众参与,最终最大限度地开发利用可再生/清洁能源。

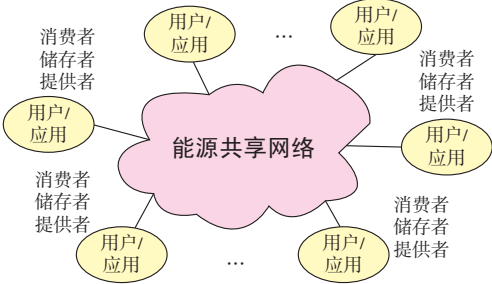


图 1 EI 的原始理念
Fig.1 Original concept of Energy Internet

然而,这种以互联网方式大众开发、利用分布式能源的方式,对人类进入可再生能源时代有多大贡献? 据估计,到 2050 年全球分布式能源年发电量也仅合标准煤 35 亿 t,约占全球总发电量的 15%和一次能源消费的 11.5%^[1]。而可再生能源资源特别丰富的地区往往地广人稀、规模集中。可见,在相当长时期内,分布式可再生能源的开发不能成为能源利用的主要形式。

同时,电能是 EI 中多种能源和应用关联的基本能源形式,因此它必然受到电能物理属性的约束:①空间约束,即电能的传输是有损耗的,特定的电压等级有合适的经济传输距离和容量匹配关系;②时间约束,即电能的利用是瞬时(实时)平衡的(供用电相等);③无(精确)溯源性,即无法精确区分所消费的电能具体由哪个电源点提供。这些物理属性限制了分布式能源实现共享的地理范围(单个用户的容量并不大),而即使用户在广域内依托某种商业机制实现了名义上的能源共享,其实质还是以就地平衡为主。可见,分布式能源的开发和利用在局域范围内最经济。

因此,通过分布式能源利用实现 EI 从而解决能源问题有其局限性。基于以上分析,同时考虑到社会能源支撑系统(包括电力系统)的渐进式发展、智能电网的发展现状、分布式可再生能源的利用前景等因素,剖析得出 EI 的体系架构和关键支撑技术如图 2 所示。

图 2 中架构特点在于:①EI 应是广域(乃至全

球)EI 和局域 EI 的有机结合,这是由全球资源禀赋和电能的物理属性所决定的;②在广域层面,EI 更多地表现为互联能源网络(特别是广域智能电网)的特点,以电能为基础形式,电力、天然气、氢气等多种能源网络互联互通,起到了广域范围的基础能源保障、能源高效传输、资源优化互补配置的作用;③局域 EI 应大众参与,运行机制分布自治,物理上以就地平衡为主,商业模式采用互联网式(可以是广域);④在终端应用层,各类能源用户,各类用户侧热(冷)网、气网、电网等能源网络,交通、矿山等能源应用都是 EI 的重要组成部分。

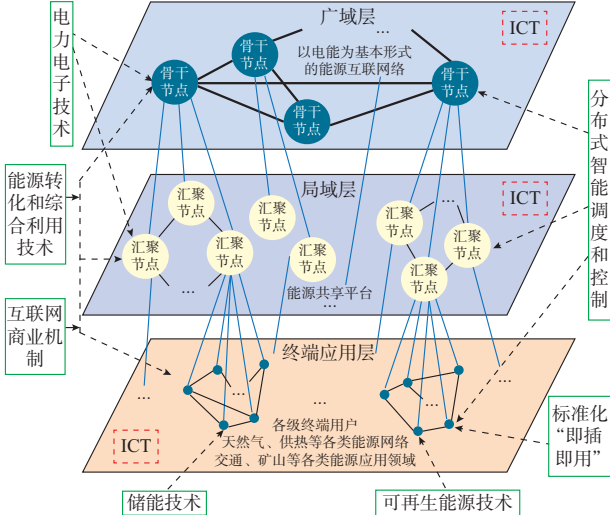


图 2 EI 体系架构及关键支撑技术
Fig.2 Architecture and key supporting technologies of Energy Internet system

综合以上分析,认为广义的 EI 理念是包含广域和局域层面的完整的能源网络系统,在广域范围主要表现为互联能源网络(主干是电网)的特征,在局域则主要表现为能源共享网络的特征。狭义的 EI 理念则主要是指按照互联网机制运转的能源共享网络。从当前的技术、经济条件看,狭义的 EI 还只能在局域范围内实现,随着技术和经济条件的变化,它所覆盖的空间范围将有所扩大,电压等级也会有所提高。

2 EI 与智能电网的区别与联系

当前国内外电力工业普遍在开展智能电网研究和建设,明确 EI 与智能电网的区别和联系有着重要意义。

从内容特征来看,两者确实联系紧密。例如:考察智能电网的本质动因^[15]、发展机理^[16]、中国坚强智能电网的五大内涵,即坚强可靠、经济高效、清洁

环保、透明开放、友好互动等, EI 可以说也都具备, 只是 EI 有更多其他特征, 所以许多研究认为智能电网的未来发展就是 EI^[8], 或者 EI 是智能电网 2.0^[9]。

笔者认为从 EI 的广义理念来看, EI 在广域范围内就是智能电网, 就是全球 EI, 特高压和智能电网是 EI 存在和运转的基础。但是从 EI 在局域表现的能源共享网络特征来看, 智能电网在很多方面只表现为传统电网的升级, 而没有将多种能源互联和利用作为其突出特征。除了能源形式、实体范围、组网方式^[7]这些外在的不同, 其最大的区别在于所面对的场景不同。

1) 局域 EI 所面对的是可再生能源普遍开发, 多种能源互相转化, 海量用户节点同时参与能源提供、储存和使用的场景, 而智能电网则立足于以化石能源为主, 逐步向可再生能源时代转化的目前场景。

2) 局域 EI 强调的是分布式开发可再生能源, 智能电网则没有强调这一特征, 并且在实践中更多的是解决集中式开发所带来的各种问题。

没有智能电网, 狭义 EI(局域能源共享网络) 绝大多数情况都不能保持自我平衡(可再生能源未必足够, 并且有波动性等特征), 难以全面支撑当地经济社会的发展。同时局域能源共享网络的发展也将给智能电网带来深刻影响: 一方面, 保障一个局域能源共享网络的平衡不难, 但在多时空尺度保障海量局域能源共享网络的平衡则给智能电网带来了新的挑战; 另一方面, 电网本身的特征也因为众多局域能源共享网络而逐步发生改变, 如多种能源网络互联、大规模电动汽车充放电、分布式能源渗透率由量变到质变的提高等。

3 EI 中的关键技术和机制

就广域(全球)EI 而言, 特高压和智能电网的持续发展已为其奠定了重要技术基础, 然而要建成全球 EI, 则面临一系列重大的技术经济问题, 可谓任重道远。局域能源共享网络所面临的许多新的技术问题则更为具体。综合分析后得出图 2 所示的支撑未来 EI 发展的基础关键技术和机制如下。

1) 能源转化和综合利用技术。建立以电能为基本形式的多种能源融合传输和供给渠道, 实现多种能源相互间的转化和综合应用, 不论是对于 EI 广域层、局域层还是终端应用层都具有重要意义。目前这方面的研究总体还比较初步, 典型的如电网和天然气网的融合^[7]、电转气^[21]、冷热电三联供、用户端综合能效系统等, 在体系性和实用性等方面都还有很大差距。

2) ICT。EI 的实现, 包括支撑其实现的其他关键技术本身的应用都离不开 ICT 支撑, 文献^[17]等已进行了深入研究, 可以说目前 ICT 总体上是先进的, 互联网的发展就是明证, 但其在 EI 中的应用还面临着许多特殊需求。目前的主要工作在于支撑能源共享平台的建立、对各类能源共享业务的支撑、适应 EI 发展的多网融合通信、云计算等关键技术的深入应用。

3) 电力电子技术。固态变压器是目前多个 EI 原型系统的开发和实验焦点^[12], 从目前看 EI 各级节点的实现都离不开电力电子技术的支撑^[18]。目前的主要差距在于新型半导体功率器件的实用化、以电力电子变压器为核心的能源路由器的实用化、支撑 EI 中终端节点综合能源及储能系统应用、高电压大容量电力电子装置的设计和应用。

4) 可再生能源技术。包括采集、并网、输送技术, 以及多种形式能源的协调和利用。目前的主要差距在于个体分散化的可再生能源开发、可靠和低成本的综合能源利用、电网对大规模分散式开发的可再生能源的并网接纳及其可能引起的问题的应对。

5) 储能技术。利用其对功率和能量的时间迁移能力以应对电能利用的时间约束特性和可再生能源的波动性^[19-20]。目前各种方案普遍受限于技术水平、经济成本、应用规模及使用寿命、实施便利性等因素。部分新技术, 如“电转气”^[21]或以冷和热的方式储能, 其实际效能还需大幅提升。

6) 标准化即插即用接口技术。这是未来海量终端能源节点的必然要求, 特别是对于分布式能源的大众化开发。由于 EI 本身还只是处于理论研究和少量的实验室原型系统开发验证阶段, 标准化工作还处于起步阶段。

7) 控制和调度技术。怎样保持未来 EI 的安全稳定和精确平衡是一个挑战, 海量节点、更多储能系统的加入、分散平等的网络构建方式决定了控制和调度技术必然发生巨大的变化^[22], 目前来看, 分布式智能控制、多智能体控制、复杂网络等理论都是可考虑的支撑理论。即插即用、分布自治、集中协调必然成为 EI 的主要控制方式。

8) 互联网商业机制。互联网商业机制是能源共享网络的重要组成部分, 调动大众参与开发可再生能源的关键。这些机制在互联网已经得到广泛验证, 从 ICT 支撑角度考虑没有问题, 目前的主要差距在于适应电能利用特性的机制设计、相关政策和制度的调整等。

其他还有很多相关的重要技术, 如超导技术、需

求响应技术、微网和主动配电网技术等。

由于目前 EI 研究还处于起步阶段,仅有部分原型系统,许多问题还没有充分暴露。以能源路由器为例,它是仿照互联网网络设备的最直接结果,目前普遍认为是 EI 的关键甚至核心设备,被赋予了能源转化、变压、交直流转换、控制电能传送路径、控制电能质量,甚至自动化地互联实现电能供需平衡的功能。其实上述功能目前电网中都有,只是由分散各处的不同设备和系统协作完成。能否基于电力电子技术(或其他技术)采用若干个能源路由器就可实现以上功能,甚至把电能或其他能源像信息一样自动路由实现供需平衡,支撑复杂的互联网商业机制?笔者认为可以大胆尝试,但必须要考虑到电能与信息的本质不同,避免照搬和走弯路。毕竟除了时间和空间约束,电能并不像信息那样可以任意分包、边界清楚、重复使用,也就决定了它难以实现精确的溯源性。同时还要考虑到电力电子等技术的实际成熟程度。

4 EI 的发展可能性及其发展路径

4.1 基本判断

人类社会将进入可再生能源时代,这一点没有疑义。但在可再生能源时代,EI 中的“能源共享网络”是否会如文献[3]中所述一样走向现实?核心问题在于:①场景问题,即可再生能源是大规模集中开发,还是由海量用户分散开发利用;②技术问题,大规模集中开发并远程输送已由特高压和智能电网在广域内实现并正在完善提升,而局域分散式开发的 EI 则受限于部分关键技术和机制。

对于场景问题,由于自然、地理和社会条件的限制,分散式和集中式大规模开发应长期并存。对于两类场景的多寡,除了技术条件,还需要具体分析。例如:水能和海洋能开发,应该普遍以集中开发为主;光伏开发,看似是最有希望实现分布式开发的能源,理论上,太阳抵达地球的辐射能量约为 173 000 TW/s,每年相当于 1 700 000 亿 t 燃煤放出的热量,约为世界年耗能的 10 000 倍^[2];风能则有很大的分布式开发前景,作为太阳能的一种转化形式,据估计全球风能总量约 2 740 TW,其中可开发的风能约 20 TW^[2];其他如生物质能、地热能等也都有可能实现分布式开发;进而以需求响应为特征的用户综合能效系统也很有希望得到普遍应用^[10]。然而,很多偏远地区用能需求很小,但恰恰又是可再生能源集中的地方,适合目前的集中式开发。

对于技术问题,在其他各类支撑技术的基础上,当前 ICT 是领先和起到促进作用的;能源转化和综合利用技术、电力电子技术、可再生能源技术、储能技术则成为 EI 实现和发展的“硬条件”,当前它们都不同程度地存在瓶颈;分布式智能调度与控制、互联网商业机制、“即插即用”标准化则成为“软条件”,它们需要各类技术(特别是 4 个“硬条件”)的支撑。因此核心问题在于:未来储能、电力电子等技术能否有所突破并走向实用;能否找到高效、廉价而又便于实施的可再生能源开发技术;并最终促进 3 个“软条件”的成熟。当然作为以上技术综合应用的 EI 原型系统开发和实验是否成功也很重要。

从文献[3]来看,其第 1 部分标题就是“即将爆发的第三次工业革命”,可见从里夫金的观点来看,目前以 EI 为核心特征的第三次工业革命还未开始或者刚刚开始。

综合以上分析和文献[1]中的规划,笔者认为 2020 年以前,EI 在广域上将逐步形成全球电网广域互联的共识,而局域的“能源共享网络”只会在很小的局域范围内和 10 kV 以下电压等级出现,因其容量小,对电网平衡的影响可以忽略,但为后续发展积累了经验,为 EI 发展的硬、软条件的成熟奠定了基础;2020—2040 年,EI 在广域上将逐步沿着跨国、跨洲互联方向推进,全球大型能源基地得以建设,而局域出现规模化的能源共享网络的可能性很大,其数量上也比较成规模,具体的局域范围、电压等级则取决于当时的技术、经济条件,特别是 4 个硬条件的成熟程度;2040—2050 年,全球将逐步形成广域互联的 EI,其下联结着若干分布全球的大型能源基地和海量的局域能源共享网络(含多种能源形式),并在经济社会中实现普遍的电替代和清洁替代。

4.2 可能的商业机制

网络只是起到一个平台作用,商业机制才是互联网成功的关键。同样,合理的商业机制直接关系到用户参与 EI 建设的积极性,对于 EI 的发展至关重要。

电力体制改革 9 号文^[23]的发布,标志着在用户侧引入竞争、进行市场化发展的趋势,对于 EI 的发展具有重要意义。同时也需要看到,目前影响用户投入和收益的政策、经济形势、技术发展等不确定因素太多,这里面有很多商业机遇,也有很多陷阱。建立能源共享平台的商业机制,还有许多问题需要研究,特别是政策、市场管理措施、参与方角色、投入和收益分配、结算方式等方面。

4.3 可能的发展路径

EI 的发展前景非常广阔,但其具体实现还依赖于许多技术和其他条件。特别是在发展初期,它需要合适的发展平台,需要合适的切入点以走进实际应用。未来实际的能源系统,应该是各种技术和机制经过实践检验、淘汰、演变形成的。

在各项支撑技术顺利进展的情况下,EI 可能的发展路径如图 3 所示。其具体形态,则取决于各地不同的资源特点和当时经济社会发展情况。

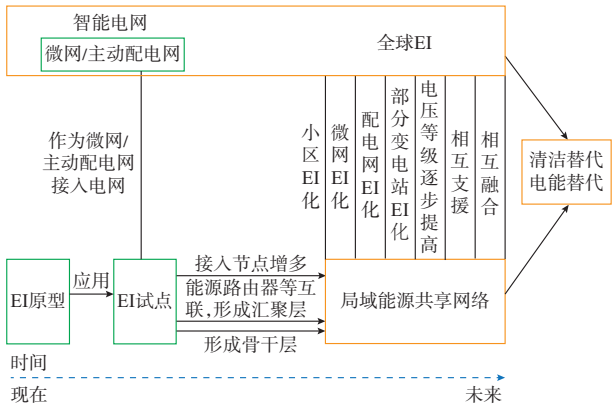


图 3 EI 可能的发展路径
Fig.3 Possible development path of Energy Internet

5 结语

EI 的建设是改变整个社会能源结构的重要举措。正如 1969 年互联网发展之初,只是由 4 台机器组成 ARPANET 小网,但不到 50 年时间,今天的互联网已全面改变了世界。出于国内能源形势的需要,也为了在该领域获得先发优势,提前部署有关 EI 的研究和试点布局很有必要。

基于前文的分析,可以认为 EI 是全球 EI 和局域能源共享网络的有机结合,二者相辅相成。研究和建设 EI 需要考虑以下几个方面。

- 1) 全球化顶层布局,在中国已经取得的特高压、智能电网建设成果基础上,以全球 EI 为抓手,着眼于全球能源大局,做好顶层设计并推进。
- 2) 信息通信研究先行,优先建立局域能源共享平台。
- 3) 硬件基础是关键,通过对各项关键支撑技术的基础性研究打好基础。
- 4) 软件条件要跟上,其中引入互联网发展精髓的商业模式设计是 EI 的灵魂。
- 5) 以微网/主动配电网研究为试点,建立局域能源共享网络,依从自然发展规律,逐渐增多接入电网的局域 EI 数量。

EI 如果真正地得到实现,那不仅仅是一种技术创新,更重要的是一种面向清洁、可再生能源而重构的能源生产、转化、传输、储存、消费、管理模式。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

[1] 刘振亚.全球能源互联网[M].北京:中国电力出版社,2015:1-20.

[2] 路甬祥.清洁、可再生能源利用的回顾与展望[J].科技导报,2014,32(28/29):15-26.

LU Yongxiang. Review and prospect of clean, renewable energy utilization [J]. Science & Technology Review, 2014, 32(28/29): 15-26.

[3] 里夫金.第三次工业革命[M].张体伟,孙毅宁,译.北京:中信出版社,2012.

[4] 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.

[5] Federal Ministry of Economics and Energy of Germany [EB/OL]. [2015-01-14]. <http://www.e-energy.de/en/index.php>.

[6] 邓雪梅.日本数字电网计划[J].世界科学,2014,7:19.

DENG Xuemei. Digital power grid plan in Japan[J]. World Science, 2014, 7: 19.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 蒲天骄,刘克文,陈乃仕,等.基于主动配电网的城市能源互联网体系架构及其关键技术[J].中国电机工程学报,2015,35(14):3511-3521.

PU Tianjiao, LIU Kewen, CHEN Naishi, et al. Design of ADN based urban energy internet architecture and its technological issues [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3511-3521.

[12] 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,2014,44(6):714-727.

CAO Junwei, MENG Kun, WANG Jiye, et al. An energy internet and energy routers [J]. Science China: Information Science, 2014, 44(6): 714-727.

[13] 盛万兴,段青,梁英,等.面向能源互联网的灵活配电系统关键装备与组网形态研究[J].中国电机工程学报,2015,35(15):

3760-3769.

SHENG Wanxing, DUAN Qing, LIANG Ying, et al. Research of power distribution and application grid structure and equipment for future energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(15): 3760-3769.

[14] 黄仁乐,蒲天娇,刘克文,等.城市能源互联网功能体系及应用方案设计[J].电力系统自动化,2015,39(9):26-33.

HUANG Renle, PU Tianjiao, LIU Kewen, et al. Design of hierarchy and functions of regional energy internet and its demonstration applications[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 26-33.

[15] 姚建国,赖业宁.智能电网的本质动因和技术需求[J].电力系统自动化,2010,34(2):1-4.

YAO Jianguo, LAI Yening. Views on smart grid evolution[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 1-4.

[16] 高志远,姚建国,曹阳.智能电网发展机理研究初探[J].电力系统保护与控制,2014,42(5):116-121.

GAO Zhiyuan, YAO Jianguo, CAO Yang. Primary study on the development mechanism of smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 116-121.

[17] 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(3):1-18.

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(3): 1-18.

[18] 姜建国,乔树通,郜登科.电力电子装置在电力系统中的应用[J].电力系统自动化,2014,38(3):2-6.

JIANG Jianguo, QIAO Shutong, GAO Dengke. Application of power electronic equipments in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(3): 2-6.

[19] 国家电网公司“电网新技术前景研究”项目咨询组.大规模储能技术在电力系统中的应用前景分析[J].电力系统自动化, 2013,37(1):3-8.

Consulting Group of State Grid Corporation of China to Prospects of New Technologies in Power Systems. An analysis of prospects for application of large-scale energy storage

technology in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 3-8.

[20] 袁小明,程时杰,文劭宇.储能技术在解决大规模风电并网问题中的应用前景分析[J].电力系统自动化,2013,37(1):14-18.

YUAN Xiaoming, CHENG Shijie, WEN Jinyu. Prospects analysis of energy storage application in grid integration of large-scale wind power [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 14-18.

[21] 王一家,董朝阳,徐岩,等.利用电转气技术实现可再生能源的大规模存储与传输[J].中国电机工程学报,2015,35(14): 3586-3595.

WANG Yijia, DONG Zhaoyang, XU Yan, et al. Enabling large-scale energy storage and renewable energy grid connectivity: a power-to-gas approach[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3586-3595.

[22] 魏韡,梅生伟,张雪敏.先进控制理论在电力系统中的应用综述及展望[J].电力系统保护与控制,2013,41(12):143-153.

WEI Wei, MEI Shengwei, ZHANG Xuemin. Review of advanced control theory and application in power system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(12): 143-153.

[23] 《关于进一步深化电力体制改革的若干意见》中发〔2015〕9号 [EB/OL]. [2015-03-30]. <http://www.ne21.com/news/show-64828.html>.

姚建国(1963—),男,教授级高级工程师,主要研究方向:电力系统自动化、智能电网及调度。E-mail: yaojianguo@epri.sgcc.com.cn

高志远(1972—),男,通信作者,硕士,高级工程师,主要研究方向:智能电网、厂站自动化系统。E-mail: gaozhiyuan@epri.sgcc.com.cn

杨胜春(1973—),男,博士研究生,教授级高级工程师,主要研究方向:需求响应、智能调度、电网调度自动化。E-mail: yangshengchun@epri.sgcc.com.cn

(编辑 章黎)

Understanding and Prospects of Energy Internet

YAO Jianguo, GAO Zhiyuan, YANG Shengchun
(China Electric Power Research Institute (Nanjing), Nanjing 210003, China)

Abstract: The Energy Internet has now become a hot spot research topic. However, there still exist many disputes about its concept, structure, technology and development path. Based on an investigation of the Internet development experience, the essence and characteristics of the Energy Internet are analyzed, the distinction and connection between the Energy Internet and smart grid are made clear, the key supporting technologies combed, and its possible development paths put forward. It is pointed out that the Energy Internet has broad and narrow meanings. The development of the Energy Internet relies on eight key technologies, such as information and communication technology (ICT), business models on Internet, etc. In the future, there will coexist two kinds of development models and paths, one is the top-down wide area global energy interconnection model, the other the bottom-up local area energy sharing network model.

Key words: smart grid; Energy Internet; energy interconnection; information and communication technology (ICT); renewable energy; energy storage