

能源互联网未来发展综述

张国荣,陈夏冉

(合肥工业大学 教育部光伏系统工程研究中心,安徽 合肥 230009)

摘要: 融合了电力、互联网、信息等学科的能源互联网可依照 Internet 理念组网。阐述了能源互联网的概念、特点、框架等内容;简要介绍了其关键组成部分,包括分布式可再生能源、储能装置及能源路由器等;总结了国内外能源互联网的发展状况。在此基础上对分布式能源并网影响、高效储能技术、接口标准、信息互联系统建设、电力市场与服务完善等若干未来能源互联网发展中可能遇到的问题进行了说明和分析。

关键词: 能源互联网; 分布式可再生能源; 储能; 能源路由器

中图分类号: TM 61

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.01.001

0 引言

《The Third Industrial Revolution》一书中描绘了这样一幅未来场景^[1]:清洁的可再生能源像互联网中的信息一样被存储和共享,每栋建筑、每个家庭都接入这个能源互联网络,既是能源的消耗者又是生产者,在自给自足的同时还可将富余的能量出售。

据《BP 世界能源统计年鉴(2015)》,若按照当前开采速率,目前储备的煤炭、石油、天然气资源分别仅可供使用 110 a、52.5 a 和 54.1 a^[2]。新能源方面,全球累计光伏装机容量由 2007 年的 9 183 MW 增长到 2013 年的 138 833 MW^[3];2014 年累计风电装机容量相较 2007 年也激增 4 倍,达到近 40 000 MW^[4]。随着非可再生能源的日渐枯竭,粗犷低效的传统能源管理利用方式已落后于现代社会要求,加之分布式可再生能源迅速发展,基于分布式可再生能源的能源互联网逐渐引起了全世界学者的广泛关注^[5-7]。能源互联网是将能源的生产、管理、利用等环节按依照 Internet 互联网的理念组网联结,涉及电力、通信、材料等多个领域。文献[8-9]阐述美国北卡州立大学提出的 FREEDM 系统工作原理及发展愿景,说明了“即插即用”能源互联系统的可行性;文献[10-11]对智能电网及能源互联网建设中的关键技术做了简要的分析。文献[12]将 MUHM 模型、信息网和传统电网三者进行对比,说明能源互联网与传统电网区别明显,而与信息网络有很大相似度,这种相似度对于能源互联网的建设具有指导意义。文献[13-15]阐述及研究了能源网中大规模应用的分布式储能及管理技术,其中混合储能技术可在能源互联网中进一步推

广。文献[16-17]进行了能源路由器的软硬件设计,并基于复杂网络理论,提出“拥塞控制”、“负载均衡”及联合控制的路由策略,有利于能源网络的安全高效运行。文献[18]从电力系统架构的角度研究在交流配电网的基础上如何经济地建设能源互联网。另外,中国电科院^[19-20]、清华大学^[21-23]等机构也着手对能源互联网的研究。

本文对基于可再生能源的能源互联网未来发展进行研究,首先对能源互联网进行简单介绍,然后总结了包括美国、德国等国内外能源互联网的发展情况,着重对其未来发展可能面临的问题做出分析并给出建议。

1 能源互联网

1.1 能源互联网概念与特点

能源互联网是一种建立在电力电子技术与信息通信技术 ICT(Information Communication Technology)的基础上,利用能量信息管理系统将集中或分布式可再生能源、储能装置、耗能负荷等联结为一有机的整体,使其协调工作,通过能量与信息紧密耦合实现安全高效协调共享的新型能源利用体系^[24]。图 1 中控制子站负责各微电网间的通信,能量控制系统控制区域间及其内部的能量调配交换。传统电站、可再生能源电站与地热能、氢能站等产生的各种形式能源可以相互转化,实现最优配置。工业、商业、住宅建筑在消耗能源的同时也是小型能源电站,储能装置也以集中和分布的方式接入能源网。系统内部以信息流控制能量流,保证安全性与可靠性。

如果将智能电网称作“电网 2.0”,那么能源互联网可理解为“电网 3.0”,能源互联网除了具有智能电网诸如自愈、安全可靠、经济高效、兼容、与用户友好互动等特点外^[25],也在智能电网技术的基础上进行了升级与拓展。首先,相较智能电网,能源互联网支撑更高比例分布式可再生能源的接入,将更加精准

收稿日期:2015-12-16;修回日期:2016-09-04

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2015-AA050104);广东省引进创新科研团队计划资助项目(2011N-015)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2015AA-050104) and the Introduction of Innovative Research Team Program in Guangdong Province(2011N015)

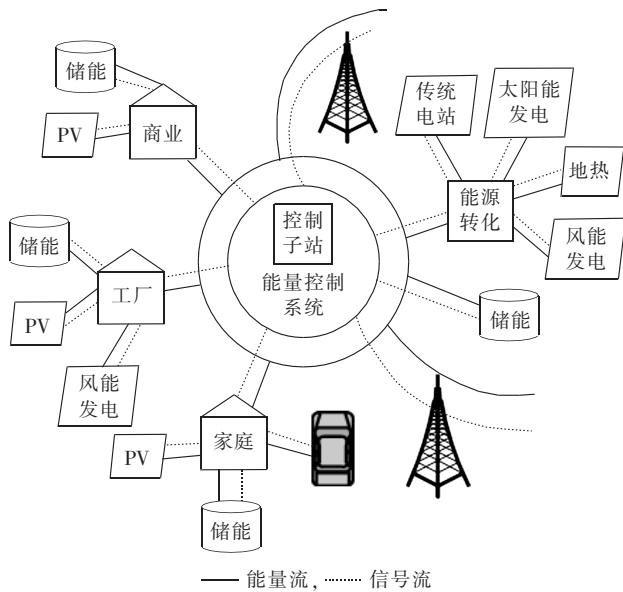


图 1 能源互联网组网示意图

Fig.1 Schematic diagram of energy internet structure

的预测技术与储能、负荷平移技术相结合,削峰填谷平衡供需。进行电能质量综合治理,关注由分布式能源接入引起的谐波污染、无功不足及电压闪变等问题。此外,采用新的继电保护整定方法和调度策略确保安全经济运行;其次,更多地强调能源的供需互动,能源的供给与需求侧的直接联系将更加紧密,冷、热、气、电等不同形式的能源的转换配置更加频繁;最后,信息技术在智能电网中集中体现于上层的工业控制系统^[6],而能源互联网中的信息流贯穿于发、输、配、售的环节,涵盖供给、需求、控制、商业等全领域,同样强调信息对于个体用户发挥的作用。

能源互联网可总结具有以下特点^[24]:(1)从化石能源等非可再生能源向太阳能、风能等可再生能源转变;(2)大规模储能装置的接入,平滑能量输出;(3)3个“就地”原则,即就地收集、就地存储和就地利用;(4)双向互动性,即用户在消耗能源的同时,也是能源的生产者;(5)发挥分布式能源的时空互补和电网的广域配置特性;(6)实现“冷热气电”联产,电能和其他形式能量相互转化;(7)信息通信技术渗透于能量流动的各环节。

1.2 能源互联网架构

能源互联网采用典型的分层控制架构,分别为终端设备层、区域联控层、全网协调层以及商业服务层^[26],能源互联网架构图如图 2 所示。

1.2.1 终端设备层

底层的终端设备层,直接面向能源的消耗和供给者,是体系最为庞大的层级,具有开放、互

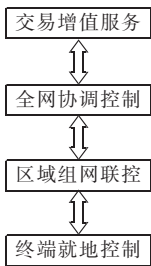


图 2 能源互联网架构
Fig.2 Framework of energy internet

动的特点。该层由各类供能、用能、储能的分布式设备组成,各类终端均采用兼容统一的接口标准,配置遵循就地、即插即用原则,其受端接口即为电力电子变压器 PET(Power Electronic Transformer)的交直流输入/输出母线。

1.2.2 区域联控层

区域联控层由分布式设备依照相应协议规范灵活组网,该层级的关键设备能源路由器主要由电力电子变压器和能量管理系统构成,电力电子变压器作为沟通电网系统与终端用户的桥梁,在能量管理系统的配合下实现能源的智能调配、故障切除等功能。将一个能源路由器辐射范围作为一个基本单位,一个或若干个单位划归为一个区域,施行区域多点联控,宏观上每个区域都可作为一个负载或电源,模块化设计避免区域故障的连锁反应。

1.2.3 协调控制层

协调控制层作为能源互联网的中枢系统,协调全网系统可靠稳定运行,此层级具有最大的信息密度和最高的操作权限,可以在更广域的层面上通过在线仿真完成智能经济调度、电能质量控制、故障保护等功能。

1.2.4 能源服务层

能源服务层为能源交易平台,是能源市场化趋势的成果,该服务层应为大众广泛参与的云平台,既针对大宗交易用户也面向普通客户,进行日常的能源买卖、输电权交易等,也为能源提供各种商业增值服务,如基于动态电价的电力期货和大数据云计算背景下的能源数据挖掘服务。该层级应在相关政策法规约束下最大限度发挥市场的自由度,孕育新的能源服务模式,旨在提高能源的利用率、实现资源合理配置,应成为整个架构中最活跃的层级。

1.3 能源互联网关键部分

1.3.1 分布式可再生能源

环境污染、化石能源短缺将人们注意力逐渐转移到可再生能源上来。目前世界上利用的可再生能源主要有太阳能、风能、地热能等。表 1 为 2012 年世界部分国家人均可再生能源消费量,由表可知中

表 1 世界人均可再生能源消费量(2012 年)
Table 1 World renewable energy consumption per capita(2012)

国家/地区	消费量(标准煤)/t
加拿大	2.74
西班牙	0.76
德国	0.73
意大利	0.52
日本	0.27
中国	0.19
印度	0.04
世界	0.19

注:数据来源于国家可再生能源中心。

国的人均可再生能源消费量已达到世界平均水平,但与欧美发达国家相比还有较大差距,仍有巨大的发展空间。按可再生能源的利用方式可以分为集中式和分布式 2 种。鉴于集中式能源的成熟技术与模式,目前依然是主流利用方式。即便如此,大规模集中能源存在诸如周边难以保证足够的负荷用户、能源利用率低、远距离传输损耗严重等弊端,而分布式能源克服了这些缺点,可以实现能量的就地收集、就地存储、就地使用,高效利用清洁的可再生能源,两者体现出互补关系。分布式能源包括用户侧分布式发电、分布式电力,以及地区性电力的有效控制和余热资源的充分利用,也包括冷热电联产等^[27]。未来能源互联网将支持更多的分布式设备接入,作为集中能源的有机补充,分布式能源已成为未来能源发展的重要方向。

1.3.2 储能装置

储能装置使电力系统的运行和调控变得更加灵活可靠,增加系统阈值,提高系统可控性。由于风能、光伏等新能源的随机性和间歇性,储能装置能减小其对电力系统的冲击。加入了具有“削峰填谷”功能的储能装置,在低负荷时也可保证机组的持续出力,提高了机组的效率和寿命,对于机组的经济运行具有重要意义。在供电故障时可迅速投入储能装置,保证重要负荷甚至全部负荷的不间断连续供电,使电网运行更加安全、可靠,也是打造“坚强的智能电网”的重要环节^[14]。

目前储能方式主要可以分为 3 种:(1)电化学储能^[28],利用正逆向化学反应过程中吸收、释放能量的特点,实现能量的储释,主要包括液流电池、铅酸电池、锂离子电池等;(2)机械储能^[29],将富余的电能以机械能(势能或动能)的形式存储起来,在需要时再转化为电能,主要包括蓄水储能、飞轮储能等;(3)电磁储能,主要有 2 种形式,一种是超导电磁储能^[30-31],该技术不需经过能量转换,利用超导体将电能直接以电磁能的形式进行存储,另一种是超级电容储能,电能以电解质电荷的形式存储在加电的电容器极板上。3 种储能方式的优劣对比如表 2 所示。

表 2 储能方式对比
Table 2 Comparison among energy storage methods

储能方式	优势	劣势
电化学储能	模块化,转化效率高,形式多样,适应不同需要	涉及使用安全问题
机械储能	寿命长,能量存储容量大	能量密度低,易受外界条件限制
电磁储能	使用寿命长,功率密度大,效率高,响应快	能量存储容量有限,造价维护成本高

1.3.3 能源路由器

路由器作为互联网中的重要节点,其主要工作就

是在不同网络之间建立连接,在传输数据时设计并选择最合理的路由,保证数据帧安全可靠地传输到目的地。类似地,能源路由器作为能源互联网中的重要中枢,连接的是 2 个电网(微电网),可以将发电、配电和用电信息集中处理。能源路由器依赖于能量管理系统^[32],为新能源选择最佳的并网方式,科学的并网调度管理机制保证最大限度新能源的接入,减少“弃光”、“弃风”率,提高能源利用率;为电网选择最可靠经济优质的运行模式,与继电保护装置配合及时投切故障区域,控制储能与无功谐波补偿装置的运行方式;为负荷选择最合理的供电路径,当需求侧发出请求,参考价格、损耗等因素配置能量的流动路径,最终通过能源路由器实现“源-网-荷”的有机统一与高效互动。

由文献^[17]可知,能源路由器由电力电子装置、通信平台及分布式智能控制模块组成。其中,通信平台负责收集传递电力系统运行等状态信息;智控模块利用综合信息完成微电网稳定性、能量流动的控制;电力电子装置作为能源路由器的重要部分,是实现能量分配与管理的物理载体,电力电子变压器作为其核心器件,可以实现电能形式转换、故障保护、电能质量改善^[33]等功能。

2 国内外能源互联网发展

2.1 美国的“FREEDM”计划

能源互联网的概念最早由美国在 2008 年提出,随后启动未来可再生电力能源传输与管理 FREEDM (Future Renewable Electric Energy Delivery and Management)能源计划。分布式可再生能源、负荷、储能装置与故障保护装置在能源智控系统的协调下工作。采用 120 V AC 与 400 V DC 的交直流混合母线系统,实现对能源的高效共享与管理^[34]。该计划将现代信息通信技术、电力电子技术引入传统电力系统,贯穿智能、分布与互联的理念,致力于打造高效、灵活、清洁的能源利用网络。

2.2 德国的“E-Energy”计划

受日本福岛核泄漏事件的影响,德国政府下令关闭所有核电站,这也恰好极大促进了分布式新能源的发展。“E-Energy”是德国联邦经济技术部于 2008 年启动的一项技术创新促进计划,其目标是建立一个自我调控的智能化电力系统,并投资 6000 万欧元启动了库克斯港 eTelligence、亚琛 Smart W@TTS、莱茵-鲁尔 E-DeMa 等 6 个侧重点不同的示范区项目^[35],为未来能源互联网的大规模建设提供了可靠的解决方案,奠定了实践基础。

2.3 日本的“数字电网”计划

近年来日本的新能源发展迅猛,为解决新能源并

网对电网的扰动,日本政府提出建设“数字电网”,即基于互联网理念,将原本集中式的大电网逐步分解为相对独立、非同步的微电网,再由能源路由器统一分配 IP 地址,以分散控制方式实现电力系统的虚拟一体化,既让子电网摆脱了大电网频率、电压等方面的束缚,又保持了大电网的整体平衡性^[36]。

2.4 中国的“互联网+”与坚强智能电网

国家能源科技“十二五”规划中,新能源技术作为 4 个重点布局的科技领域中的一个重要方面,大型风力发电技术、高效大规模太阳能发电技术、大规模互补能源发电技术等方面被提及重点建设,为新能源技术带来了空前的发展机遇。

2015 年 3 月的李克强总理的政府工作报告中提出了“互联网+”行动计划,强调了互联网与传统行业的深度融合。能源互联网正是互联网与传统电力能源行业结合的产物,其提出与发展也契合了“互联网+”的趋势,有利于促进能源系统的扁平化,推进能源生产与消费模式革命,提高能源利用效率,推动节能减排。

自 2009 年我国提出“打造坚强智能电网”以来,在特高压直流输电、交直流混合微电网、分布式发电等方面都取得了瞩目的成就,这无疑为能源互联网的建设奠定了坚实基础。为此,国家电网公司于 2013 年 12 月明确指出,未来的智能电网就是“能源互联网”。

3 能源互联网发展可能面临的问题

3.1 大规模分布式能源投入对大电网造成的影响

能源互联网的一个重要特点就是大量分布式新能源的投入,由于分布式能源具有分散性和间歇性的特点,现阶段分布式能源的应用还是需要依托现有大电网为基础,其变换的随机性也会对电网造成冲击。其次,分布式能源的接入会改变电网原先的电力网络,改变电力系统的暂态和稳态特性,因此电网的潮流分布、故障分析、继电保护、经济运行等方面将发生变化。尤其是未来能源互联网发展具有“即插即用”特性,系统的暂稳态特性及继电保护条件将是实时复杂变化的,动态化的系统特性对电网的可靠高质量经济运行提出了更高挑战。

为此,应建立更加精确的模型进行预测工作,科学地进行风能、光伏等电源出力以及负荷预测,以合理安排机组出力和负荷投切、检修等工作,实现经济效益和社会效益的最大化。常用的预测方法主要有传统算法如趋势分析法、回归分析法^[37]等以及现代分析法诸如神经网络预测^[38]、灰色预测^[39]等技术。

3.2 高效储能技术

1.3.2 节提到储能装置的能量吞吐作用使得能

源互联网变得更加可控,减小分布式能源对电网的冲击,提高新能源的利用率和电网运行的可靠性,是发展能源互联网不可或缺的环节。基于分布式能源的能源互联网储能设备广泛分布于用户侧,面向的用户可能是一栋大楼甚至是一户家庭,因此需避免高额的初期投资,并保证较高的经济效益,这对储能系统的存储效率、功率密度、使用寿命等提出了更高的要求^[11]。

一些传统的储能方式因地形限制、能量密度低、寿命短等缺点限制了其在未来能源互联网中的应用。为此,应优化能量管理方式以及研究发展新储能材料与技术。新储能技术之一的氢储能技术是利用电能与化学能之间的相互转化,如图 3 所示,即其在电力过剩时采用电解水的方式获得氢气,然后低温液态存储起来,在需要的时候通过燃烧产生能量发电。突破时空限制实现了能量的存储运输,前景十分广阔^[40]。发展混合储能技术,因地制宜,合理配置,优势互补。优化能量流动路径和储释时刻,施行分批次投入工作,延长装置使用寿命。

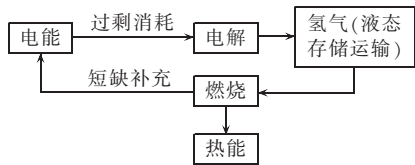


图 3 氢储能技术

Fig.3 Technology of hydrogen energy storage

3.3 制定接口标准

智网建设,标准先行。能源互联网中为了实现供电侧、用户侧以及控制中心的信息交互与能源共享,之间的互联接口是必不可少的。标准化是支撑智能电网发展、规范智能电网建设的根本,也是实现电网侧和用户侧互操作的基础^[41]。目前国外已经制定或正在制定的与智能电网接口相关的标准主要有 OpenADR 2.0、绿色按钮、SEP 2.0、OASIS 能源互操作协议^[42]等,基本满足需求响应和价格通信方面的要求。但国内对于此领域基本还处于空白状态,相关标准正由中国电力科学研究院等机构积极制订中。

依据能源互联网的建设要求,标准化的接口应具有以下几个功能。

(1)对接入装置的准确识别。接口应能及时准确地对接入的装置进行识别,获取接入电力源或负荷的位置、种类、容量等信息,并上传至控制中心用于系统管理制定继电保护、经济运行等策略。

(2)应建立统一规范的标准化接口,做到互联设备的“即插即用”,即使为了满足不同种类装置需要采取了不同协议规范,其之间也应相互兼容,避免碎片化,有利于全国乃至全球能源网的互联。

(3)接口还应具备保护监测功能,作为接入装置的第一道管理及保护屏障,应能实时监测与上级管理层间信息流、能量流的交换信息,如电能质量、异常事件等,及时识别并切除故障。

3.4 坚强可靠的信息互联系统

能源互联网依赖于信息共享,需建立在安全坚强可靠的信息互联系统之上,若中枢网络遭受恶意攻击、信息流通受阻、灾害致自身物理故障、数据备份缺失等情况,后果将不堪设想。

未来的能源互联网是由成千上万的楼宇和家庭组成的能源网,其信息互联系统必定是一个极其复杂与庞大的网络体系,为确保系统可靠性,给出几点建议^[43-44]:

(1)规划合理的网络结构,可从节点度与聚集系数、通信路径等结构参数的优化着手;

(2)增加冗余在线备份链路,可以无缝切换,及时投入替换故障单元;

(3)不断升级网络安保系统,提高抵御病毒和网络治愈能力;

(4)培养一批高素质网络安全人才作为系统可靠性的坚强后盾,进行日常管理维护及处理重大突发事件。

3.5 加快电力市场建设,完善电力市场服务

现阶段,电力市场是能源市场的重要方面,其发展对其他形式的能源市场具有重要的借鉴意义。我国的电力市场建设始于1998年,在组建了五大发电集团完成了“厂网分开”之后,也在积极推进“输配分离”、“竞价上网”政策。近日出台的新电改方案又提出了“搭建独立的电力交易市场”。即便如此,这显然还未能达到建设能源互联网电力市场的需要,未来的电力市场应具备以下几个特点^[45-47]。

(1)充分发挥市场调节的作用,引入市场的竞争与激励机制,提高发电、输电、配电、售电环节的效率,发挥政府宏观调控作用,普通用户亦广泛参与电力市场,避免一家独大和有序恶性竞争的局面。

(2)完善的交易体制,打造能源交易云平台,建设大用户直购与售电公司代理并存;以中长期交易为主、现货交易为辅,并逐步发展电力期货交易;优化跨区域购电结构,打破省、市区域交易壁垒;完善交易信息发布平台,普通用户也可及时便捷获取交易信息。在确保电网平稳安全的基础上,使资源得到最优化配置。

(3)完善的电力市场辅助服务,是电力系统安全可靠经济运行的重要保障。电力辅助服务主要包括调频、调相、无功支持、备用以及事故恢复、电能质量服务等。电力辅助服务应市场化、商品化,投入市场竞争,应依据服务的种类、对象、质量等对服务进行

量化,制定合理的费用标准,营造活力、有序的电力辅助服务市场。

4 结论

基于可再生清洁能源的能源互联网符合低碳、绿色、可持续发展理念,已经成为全球研究的热点。但构建能源互联网是个浩大的工程,不能一蹴而就,能源互联网的建设依赖于信息通信技术、电力电子技术、材料学、市场管理等学科的高水平发展。本文在对能源互联网深入了解的基础上,着重分析并总结了能源互联网未来发展中可能面临的诸如分布式能源对接入电网的影响、高效储能技术、完善电力市场及服务等问题,在日后的实践过程中具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 杰里米·里夫金,张体伟,孙豫宁. 第三次工业革命——新经济模式如何改变世界[M]. 北京:中信出版社,2012:27-67.
- [2] BP Group. BP statistical review of world energy 2015[EB/OL]. [2015-09-04]. <http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/Energy-economics/statistical-review-2015/bp-statistical-review-of-world-energy-2015-full-report.pdf>.
- [3] EIPA. Global market outlook for photovoltaics[EB/OL]. [2015-08-10]. <http://epia.biz/news/publications/global-market-outlook-for-photovoltaics-2014-2018/>.
- [4] GEWC. Global wind report 2014[EB/OL]. [2015-08-10]. http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2015/03/GWEC_Global_Wind_2014_Report_LR.pdf.
- [5] 李俊峰,时璟丽. 国内外可再生能源政策综述与进一步促进我国可再生能源发展的建议[J]. 可再生能源,2006(1):1-6.
LI Junfeng,SHI Jingli. International and Chinese incentive policies on promoting renewable energy development and relevant proposals[J]. Renewable Energy,2006(1):1-6.
- [6] 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.
- [7] TSOUKALAS L H,GAO R. From smart grids to an energy internet:assumptions,architectures and requirements[C]//Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT). New York,USA:IEEE,2008:94-98.
- [8] HUANG A. FREEDM system—a vision for the future grid[C]//Power and Energy Society General Meeting(PES). Minneapolis, USA:IEEE,2010:1-4.
- [9] 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.
- [10] 马其燕,秦立军. 智能配电网关键技术[J]. 现代电力,2010,27(2):39-44.
MA Qian,QIN Lijun. Key technologies of smart distribution crid [J]. Modern Electric Power,2010,27(2):39-44.
- [11] 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,2014,44(6):702-713.
- ZHA Yabin,ZHANG Tao,HUANG Zhuo,et al. Analysis of energy internet key technologies[J]. Scientia Sinica Informationis, 2014,44(6):702-713.
- [12] 蔡巍,赵海,王进法,等. 能源互联网宏观结构的统一网络拓扑模型[J]. 中国电机工程学报,2015,35(14):3503-3510.
- CAI Wei,ZHAO Hai,WANG Jinfa,et al. A unifying network topological model of the energy internet macro-scope structure[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(14):3503-3510.
- [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,2014,44(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,2014,44(6):762-773.
- [14] 唐西胜. 超级电容器储能应用于分布式发电系统的能量管理及稳定性研究[D]. 北京:中国科学院研究生院,2006.
- TANG Xisheng. Research on energy management and stability of distributed generation system with EDLC as energy storage[D]. Beijing:Doctoral Dissertation of CAS,2006.
- [15] MOHD A,ORTJOHANN E,SCHMELTER A,et al. Challenges in integrating distributed energy storage systems into future smart grid[C]//2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). Cambridge,UK:IEEE,2008:1627-1632.
- [16] 林川,赵海,刘晓,等. 能源互联网路由策略研究[J]. 电工技术学报,2015,30(11):37-44.
- LIN Chuan,ZHAO Hai,LIU Xiao,et al. Research on routing strategy for intergrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2015,30(11):37-44.
- [17] XU Y,ZHANG J,WANG W,et al. Energy router:architectures and functionalities toward energy internet[C]//2011 IEEE International Conference on Smart Grid Communications. Brussels, Belgium:IEEE,2011:31-36.
- [18] 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探讨[J]. 中国电机工程学报,2015,35(14):3551-3560.
- WANG Yizhen,ZHAO Biao,YUAN Zhichang,et al. Study of the application of VSC-based DC technology in energy internet[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(14):3551-3560.
- [19] 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[J]. 电网技术,2015,39(11):3014-3022.
- MA Zhao,ZHOU Xiaoxin,SHANG Yuwei,et al. Exploring the concept,key technologies and development model of energy internet[J]. Power System Technology,2015,39(11):3014-3022.
- [20] 黄仁乐,蒲天骄,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.
- [21] 尤石,林今,胡俊杰,等. 从基于服务的灵活性交易到跨行业能源系统的集成设计,规划和运行:丹麦的能源互联网理念[J]. 中国电机工程学报,2015,35(14):3470-3481.
- YOU Shi,LIN Jin,HU Junjie,et al. The Danish perspective of energy internet:from service-oriented flexibility trading to integrated design,planning and operation of multiple cross-sectoral energy systems[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(14):3470-3481.
- [22] 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]. Scientia Sinica Informationis,2014,44(6):714-727.
- [23] 孙宏斌,郭庆来,潘昭光. 能源互联网:理念、架构与前沿展望[J]. 电力系统自动化,2015,39(19):1-8.
- SUN Hongbin,GUO Qinglai,PAN Zhaoguang. Energy internet: concept,architecture and frontier outlook[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(19):1-8.
- [24] 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[J]. 电力自动化设备,2010,30(5):104-108.
- YU Shenhong,SUN Ying,NIU Xiaona,et al. Energy internet system based on distributed renewable energy generation[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(5):104-108.
- [25] 陈树勇,宋书芳,李兰欣,等. 智能电网技术综述[J]. 电网技术,2009,33(8):1-7.
- CHEN Shuyong,SONG Shufang,LI Lanxin,et al. Survey on smart grid technology[J]. Power System Technology,2009,33(8):1-7.
- [26] 杨方,白翠粉,张义斌. 能源互联网的价值与实现架构研究[J]. 中国电机工程学报,2015,35(14):3495-3502.
- YANG Fang,BAI Cuifen,ZHANG Yibin. Research on the value and implementation framework of energy internet[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(14):3495-3502.
- [27] 朱永强. 新能源与分布式发电技术[M]. 北京:北京大学出版社,2010:146-151.
- [28] 李军徽,朱星旭,严干贵,等. 模块化 VRB-EC 混合储能系统配置与控制的优化[J]. 电力自动化设备,2014,34(5):67-71.
- LI Junhui,ZHU Xingxu,YAN Gangui,et al. Optimal configuration and control of modular VRB-EC hybrid energy storage system[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(5):67-71.
- [29] 李德海,卫海岗,戴兴建,等. 飞轮储能技术原理、应用及其研究进展[J]. 机械工程师,2004(4):5-7.
- LI Dehai,WEI Haigang,DAI Xingjian,et al. The principle,application and progress of the technology of flywheel energy storage[J]. Mechanical Engineer,2004(4):5-7.
- [30] 陈伟,石晶,任丽,等. 微网中的多元复合储能技术[J]. 电力系统自动化,2010,34(1):112-115.
- CHEN Wei,SHI Jing,REN Li,et al. Composite usage of multi-type energy storage technologies in microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(1):112-115.
- [31] 胡毅,陈轩恕,杜砚,等. 超级电容器的应用与发展[J]. 电力设备,2008(1):19-22.
- HU Yi,CHEN Xuanshu,DU Yan,et al. Development and application of super condenser[J]. Electrical Equipment,2008(1):19-22.
- [32] 吴雄,王秀丽,刘世民,等. 微电网能量管理系统研究综述[J]. 电力自动化设备,2014,34(10):7-14.
- WU Xiong,WANG Xiuli,LIU Shimin,et al. Summary of research on microgrid energy management system[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(10):7-14.
- [33] 白杰. 电力电子变压器的应用研究[J]. 电工电气,2009(11):14-18.
- BAI Jie. Application research of power electronic transformer[J]. Electrotechnics Electric,2009(11):14-18.
- [34] AKELLA R,MENG F,DITCH D,et al. Distributed power balancing for the FREEDM system[C]//2010 First IEEE International Conference on Smart Grid Communications.

- Gaithersburg, Maryland, USA: IEEE, 2010: 7-12.
- [35] 王叶子,王喜文. 德国版智能电网“E-Energy”[J]. 物联网技术, 2011,1(5):3-5.
- WANG Yezi,WANG Xiwen. Germany smart grid “E-Energy”[J]. Internet of Things Technologies, 2011,1(5):3-5.
- [36] 邓雪梅. 日本数字电网计划[J]. 世界科学, 2013(7):10.
- DENG Xuemei. Japanese digital power grid project[J]. World Science, 2013(7):10.
- [37] 栗然,李广敏. 基于支持向量机回归的光伏发电出力预测[J]. 中国电力, 2008,41(2):74-78.
- LI Ran,LI Guangmin. Photovoltaic power generation output forecasting based on support vector machine regression technique [J]. Electric Power, 2008,41(2):74-78.
- [38] 王守相,张娜. 基于灰色神经网络组合模型的光伏短期出力预测[J]. 电力系统自动化, 2012,36(19):37-41.
- WANG Shouxiang,ZHANG Na. Short-term output power forecast of photovoltaic based on a grey and neural network hybrid model [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012,36(19):37-41.
- [39] 张俊芳,吴伊昂,吴军基. 基于灰色理论负荷预测的应用研究[J]. 电力自动化设备, 2004,24(5):24-27.
- ZHANG Junfang,WU Yiang,WU Junji. Application of gray system theory in load forecasting[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004,24(5):24-27.
- [40] LEHMAN P A,CHAMBERLIN C E,PAULETTO G,et al. Operating experience with a photovoltaic-hydrogen energy system[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 1997,22(5):465-470.
- [41] 崔全胜,白晓民,黄毕尧. 智能电网用户接口相关标准介绍和分析[J]. 供用电, 2014(11):41-44.
- CUI Quansheng,BAI Xiaoming,HUANG Biyao. Introduction and analysis of the relevant standards of smart grid user interface[J]. Distribution & Utilization, 2014(11):41-44.
- [42] BUSHBY S T. BACnet® and the smart grid[J]. ASHRAE Journal, 2009,51(11):B8.
- [43] 杨孝平,尹春华. 复杂网络可靠性评价指标[J]. 北京信息科技大学学报(自然科学版), 2010,25(3):92-96.
- YANG Xiaoping,YIN Chunhua. Research of reliability indexes of complex network[J]. Journal of Beijing Information Science & Technology University, 2010,25(3):92-96.
- [44] 刘静芳,陈赤培,樊江涛. 电力系统一体化设计中信息安全防护体系研究[J]. 电力自动化设备, 2005,25(2):83-85.
- LIU Jingfang,CHEN Chiwei,FAN Jiangtao. Research of information security and protection architecture in integrative design of power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005,25(2):83-85.
- [45] JAMASB T,POLLITT M. Electricity market reform in the European Union:review of progress toward liberalization & integration[J]. Energy Journal, 2005,26(Special Issue):11-42.
- [46] 史连军,韩放. 中国电力市场的现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2000,24(3):1-4.
- SHI Lianjun,HAN Fang. Status quo and prospects of power market in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000,24(3):1-4.
- [47] 钟宇峰,黄民翔,文福拴,等. 计及绿色证书交易机制的大用户直购电市场均衡分析[J]. 电力自动化设备, 2014,34(2):144-150.
- ZHONG Yufeng,HUANG Minxiang,WEN Fushuan,et al. Equilibrium analysis of direct electricity purchase with green certificate mechanism[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014,34(2):144-150.

作者简介:



张国荣

张国荣(1963—),男,江苏张家港人,研究员,博士研究生导师,主要研究方向为电能质量控制技术、直流微网技术、储能系统中的电力变换技术、电力电子中的计算机控制技术、光伏系统技术(E-mail:zhanggrcao@163.com);

陈夏冉(1991—),男,安徽淮南人,硕士研究生,研究方向为电力变换技术(E-mail:chenxiaran@126.com)。

Future development of energy internet

ZHANG Guorong,CHEN Xiaran

(Education Ministry Engineering Research Center of Photovoltaic System,
Hefei University of Technology,Hefei 230009,China)

Abstract: The energy internet,which integrates different technologies,such as electric power,internet,information,and so on,can be constructed based on the concept of internet. The concept,characteristics and frameworks of energy internet are elaborated,its key components,including distributed renewable energy, energy storage devices and energy routers,are briefly introduced,and its domestic and foreign developments are summarized,based on which,a number of issues possibly encountered in its future development are illustrated and analyzed,such as grid-connected distributed energy,large-scale energy storage technology, interface standards,information interconnection system construction,power market & service improvement,etc.

Key words: energy internet; distributed renewable energy; energy storage; energy router