

城市能源互联网初步认识与研究展望

洪居华,刘俊勇,向月,牛毅

(四川大学 电气信息学院,四川 成都 610065)

摘要: 城市能源互联网(UEI)可以实现城市区域内风、光、冷、热、电、气、储多种能源的高效转换和电力网络、天然气网络、电气化交通网络等多种网络的深度融合。结合多方观点,给出了 UEI 的概念;从规划、运行和运营的角度分析了 UEI 的建设将对当前电力系统造成的影响,并概述相关方面的研究动态;提出了包含元器件建模技术、综合规划技术、协调优化控制技术、运营技术在内的 UEI 关键技术体系,并从设备形态、系统规划、运行控制、商业模式和协同发展 5 个方面对 UEI 的发展和进行研究进行展望。

关键词: 城市能源互联网; 电力系统; 规划; 运行; 关键技术体系; 商业模式

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.06.003

0 引言

能源短缺和环境污染已经成为世界性难题。一方面传统能源储量不断减少,另一方面可再生能源(如风能、太阳能)的开发利用技术逐渐成熟^[1-3],结合目前高速发展的互联网通信技术和信息处理技术,美国学者杰里米·里夫金提出了能源互联网的概念^[4]。如今,能源互联网已经备受各界关注,而城市作为区域用能中心,在城市地区构建城市能源互联网 UEI(Urban Energy Internet)是城市未来发展的重要建设内容之一。由于 UEI 与配电侧结合紧密,能量转换、信息交互和商业模式等方面面临的挑战复杂多样,针对这些方面,目前各国都在积极探索如何建设 UEI。基于中新天津生态城智能电网创新示范工程^[5-6]的实践经验,2016 年 6 月国家电网天津市电力公司发布了《城市能源互联网发展白皮书(2016)》,该白皮书是国内外首个系统性谈及 UEI 建设发展的文件,其探索了多种能源间的互动机制,对智能家居、电动汽车充换电服务网络、含分布式电源的微电网、城市能源综合信息平台等都开展了相关的实践研究并取得了一系列的成果。德国是最早进行能源系统和信息系统融合技术探索的国家之一,其中的 E-Energy 项目^[7-9]对各国 UEI 研究具有一定的指导意义,其核心是将互联网通信技术与电力系统深度融合,并在 6 个城市和地区开展了相关示范工程。

本文收集相关材料,总结并探讨了 UEI 当前的发展情况和研究动态。具体工作包括:剖析了 UEI 的概念与特征;分析了 UEI 的建设将对现有电力系统造成的影响并概述相关方面的研究情况;提出了

UEI 的关键技术体系,并展望其未来的发展趋势,提出未来若干研究方向。

1 UEI 的概念和特征

目前对 UEI 的理解众多,尚未有统一的定义。文献^[5,10]认为 UEI 应以能源系统为物理核心,注重发展分布式能源采集与转换技术,以通信技术进行辅助,实现多种能源高效互补,强调的是建立多能耦合的能源系统,类似的示范工程有美国的“FREEDM”项目、新奥集团的“泛能网”项目以及加拿大社区级综合能源系统项目^[11-13]。而文献^[14-15]将互联网开放、对等、共享的理念应用于能源系统中,微电网或用户利用智能设备通过虚拟电厂等方式参与能源交易,强调的是围绕需求侧响应^[16]的能源市场,如“Smart Watts”项目^[8]。本文认为虽然国内外专家对 UEI 的解释存在差异,但本质上具有如下共性特征:

- a. 多能互联——在城市区域内,整合风、光、冷、热、电、气、储等多种能源,实现不同能源间的高效转换^[17];
- b. 广泛应用互联网技术——将信息系统与能源系统高度融合,提高能源生产、传输、转换、存储和利用等环节的智能化水平^[18-19];
- c. 以电能为核心——UEI 中涉及多种能源,相比于气与热等能源,电能具有瞬发瞬供的特点,更加便于传输、变换、存储以满足居民多样化的用能需求^[20]。

UEI 示意图如图 1 所示。综合多方观点,本文给出 UEI 概念:UEI 是指在人口密集、负荷集中的城市范围内,以电力网络为核心,基于电转气 P2G(Power to Gas)技术^[21-23]、电动汽车入网 V2G(Vehicle to Grid)技术^[24-26]等,融合供气网络、供暖/冷网络、电气化交通网等多种网络形式,建设开放的公共服

收稿日期:2017-03-03;修回日期:2017-05-03

基金项目:四川大学引进人才科研启动项目(20822041A4161)

Project supported by the Scientific Foundation for the Talent Program of Sichuan University(20822041A4161)

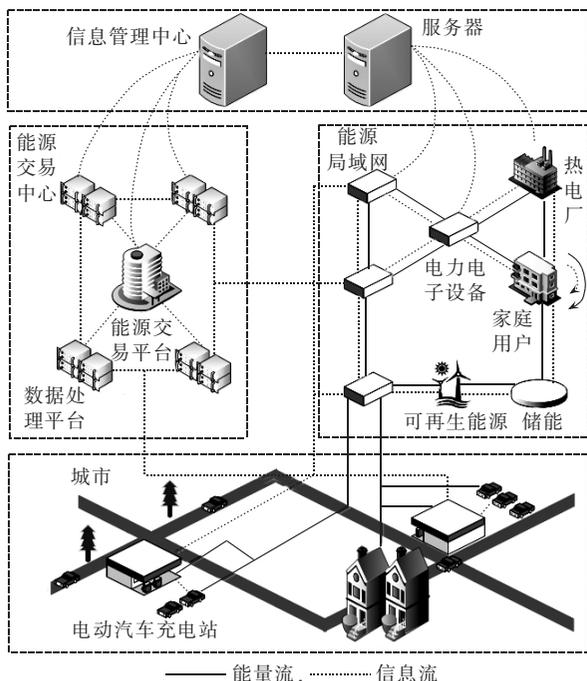


图 1 UEI 示意图

Fig.1 Schematic diagram of UEI

务中心和能量管理平台,提高用户参与积极性,解决高渗透率可再生能源的接入,提高综合能源利用效率,从而实现能量流、信息流和价值流一体化融合的能源生态系统。

其中,电力网络、天然气网络、电气化交通网络之间的耦合关系体现在网络拓扑、运行状态及市场行为 3 个层面上。从网络拓扑层面看,不同能源网之间通过一些介质设备实现连通,如电网和电气化交通网通过充电桩连接,热电联产机组可以连通热网和电网等;从运行状态层面看,不同能源网之间的耦合体现在能量的相互转化过程中,如基于 V2G 技术,电动汽车作为分布式储能单元实现与电网间的能量双向流动,以及基于 P2G 技术,利用富余电力将水电解成氢气和氧气并经处理后输入天然气管道中进行存储或发电供热等;从市场行为层面看,不同能源网之间的耦合表现为价格信号驱动下,不同能源网络中用户行为发生自主性交集,如分时电价引导下的电动汽车充电行为等。

综合现有的研究,UEI 的特征主要归纳为以下 5 点。

a. 多能耦合、多网融合。风、光、冷、热、气、电、储等多种能源相互耦合;微电网、电气化交通网、天然气网、城市热网、信息网等深度融合。目前城市地区的可再生能源仍以光伏为主^[27-29]。

b. 设备多样、场景复杂。考虑到城市工、商及居民负荷的差异化特性,能量需求场景比较复杂多

样。而不同能量的转换则需要不同的能源耦合设备,如充电桩等。

c. 交互频繁、规模量大。能量流与信息流频繁交互,虽然单一场景中涉及的能量与信息量规模较小,但由于城市内同一时刻存在大量类似场景,因而产生海量的信息。

d. 互联通信、便捷互动。互联网通信技术和信息处理技术则用于处理海量信息,同时实现供能侧和用能侧的便捷互动,有助于根据实际情况辅助用户调整最优用能行为。

e. 优质服务、经济运行。UEI 与用能侧结合紧密,服务质量将成为能源企业的核心竞争力,同时应不断创新商业模式,实现企业和用户双赢,达到市场效益最大化。

2 UEI 的建设对现有电力系统的影响

UEI 的能源系统核心是电力系统,UEI 的建设将从改造当前电力系统开始,这会对电力系统的规划、运行、运营等方面造成影响。通过进行前瞻性的总结分析,以期为国家未来的 UEI 建设提供理论参考。

2.1 UEI 建设对电力系统规划的影响

UEI 的规划是一项系统性的工程,涉及负荷预测、选址定容等问题。文献[30-33]提出了负荷预测的新思路,首先对负荷类型进行分类,研究不同类型负荷对激励手段的响应情况,提出基于需求侧响应的负荷预测方法,但是激励元太单一,未来 UEI 背景下影响用户用能需求的手段复杂且多样,除考虑用户响应外,还需要考虑不同激励手段之间的联系关系。文献[34-37]重点研究了分布式电源、储能系统、变压器、变电站的选址定容问题,基于机会约束的城市配电网规划问题和负荷不确定问题,在此基础上对城市电网综合性多目标规划问题做了进一步的研究,但未来电动汽车将呈规模化增长,在进行变压器规划时还应考虑电动汽车这一因素。文献[38-39]研究了天然气网络与城市电网协同规划的问题,将两者作为一个整体,以总建设运行成本最小为目标函数,有机地结合两者数学模型和运行约束,给出混合整数非线性规划的数学模型。文献[40-41]是将电动汽车充电站考虑在内的电网规划研究,在考虑充电站选址定容的基础上,以车流量最大和建设成本最小作为优化目标,但这类研究忽视了充电站选址对当地交通车流量影响的累积效应。综合现有研究情况,将 UEI 对电网规划的影响总结为以下 3 点。

a. 对负荷预测的影响。负荷预测是电力系统规划的基础。一方面,未来负荷预测除了考虑常规负

荷外,还需要考虑用户多样化用能需求、分布式电源容量、电动汽车保有量的增长速度等,这极大地增加了负荷预测的难度;另一方面,信息技术的广泛应用使得设计者在规划初期可以获得大量关键数据支持,有助于提高负荷预测的精度^[51]。

b. 对网络建设的影响。①改变现有城市配电网的规划理念,化被动为主动,建立主动规划意识,从源-网-荷3个方面展开:在源端,利用主动管理技术,实现可再生能源的主动消纳以及提升设备资产的利用率;在网络结构上,引入智能化电力电子设备,提高网络的灵活性;在负荷侧,应考虑未来负荷的多样性并围绕需求侧响应,提高用户参与的积极性。②现有设备智能化水平不高,发展具有物理信息强耦合特性的配电设备是改造现有系统的基础。③极大地增加了规划难度:电力系统规划是一项多维度多时间尺度的系统性工程,多网融合问题、旧网重构问题以及信息网络建设问题都使得未来电网的规划难度呈几何倍数增长。④改变现有系统规划方法:现有系统规划考虑最恶劣工况条件以保证系统安全稳定运行,然而未来需要重点考虑的是不同需求场景下的协调规划。

c. 对分析评估的影响。①评估对象更加复杂,需要重新建立一套更加全面的UEI评估指标体系。②数据分析更加困难:当前不同系统不同环节中涉及的网络通信接口和设备接口不一,提高了数据获取和分析的难度。③资产利用更加高效:投资成本是电力系统规划的重要评估指标,当前电力系统在正常运行时,大量资源被闲置,加长了建设投资成本的回收期;当某节点发生短时负荷激增时,通过快速仿真确定方案,调动闲置资源进行负荷转移,减少了设备折旧,提高了资产利用率。

2.2 UEI建设对电力系统运行的影响

UEI的建设会使电网的运行控制面临更多的挑战,如削峰填谷、微电网并网、多能耦合等。文献[42-45]讨论了交直流微电网的关键技术,研究了微电网如何在保证内部运行稳定和减少并网扰动的情况下,实现2种运行状态自由切换,具体包括了单网独立运行状态下的能量控制策略与基于多代理系统的多网协调控制技术以及电能优化调度技术。分布式能源主要以微电网的形式存在,研究微电网独立运行和并网控制是实现多能源网络融合的基础。文献[46]针对多能耦合背景下经济性与可持续性展开研究,提出一种太阳能冷热电联供系统,并重点研究了该系统的运行策略,基于生命周期分析法建立了能源效益、环境效益和经济效益的多目标优化模型。文献[47-48]介绍了一种电动汽车有序充电分层控制策略,通过求解削峰填谷两

阶段优化模型从而得到充电策略。文献[49]将需求侧作为一种可以主动参与微电网规划的电源,而非被动吸收电能的负荷,通过削减峰荷从而降低方案成本。文献[50]研究了一种电气互联综合能源系统,其实质是P2G技术的应用,提出了一种计及能源系统经济性的削峰填谷模型,利用P2G技术和燃气轮机的协调作用来平滑负荷曲线。综合上述文献以及相关的研究,UEI对电网运行的影响可以总结为以下4点。

a. 安全性。UEI中异构网络发生联系,气网时延特性通过介质设备扩散至电网,影响电网频率及出力等,可能造成电网安全性评估不准确;此外,异构网络的并网行为可能给电力网络带来扰动,引起失稳,甚至解列。

b. 经济性。当前电力系统、供热系统等为了保证各自系统稳定可靠运行,通常具有一定备用容量。未来电力系统可以通过分布式电源、电动汽车、天然气、热能等能源形式的多能互补、互为备用,从而节约投资成本。

c. 可靠性。由于分布式能源具有波动性以及随机性的特点,如果处理不当,易发生电压暂降、电压闪变、电压谐波等情况,降低系统供电可靠性^[51]。

d. 灵活性。规模化电动汽车的有序充放电行为、大量储能单元的灵活接入将在宏观层面上起到一定的削峰填谷作用,增强了电力系统的灵活性和应变能力。

2.3 UEI建设对电力系统运营的影响

国内外专家学者对UEI的关注不仅仅集中于技术创新,也包括了对商业模式和市场机制的研究。文献[52]从能源服务、数据利用、技术创新、体制改革4个方面详细分析了未来UEI可能存在的商业模式,提出了能源交易、能源价格、能源市场三位一体的交易体系。文献[53]基于信息经济学原理,分析了信息通信技术对未来能源交易的巨大促进作用,在此基础上阐述了未来UEI能源交易的七大转变,并列出了16个可能存在的商业模式以供讨论。文献[54]考虑到天然气发电虽然有助于保护环境但成本较高,利用天然气资源进行供电是不符合经济性要求的,因此考虑将天然气发电作为一种电力调峰调频资源,则可以兼顾经济性和环保性。文献[55]提出一种车主、运营商、电网及弃风场共同合作的V2G商业模式,建立以运营商期望收益最大化为目标、车主需求为约束的日前优化调度模型,实现消纳风力发电的目的。文献[56]研究了分时电价下电动汽车的响应行为,并探索了电价与车主响应力度之间的关联关系。结合相关材料,UEI对电网运营的影响可以总结为以下3点。

a. 交易模式。当前各能源系统独立运营,UEI 的发展有助于改变这一现状,早日实现多能源系统互通。此外,UEI 也有助于将市场交易从寡头垄断中释放出来,增加市场活力。

b. 商业模式。目前电力系统的商业模式单一,主要通过输电网络将电能送达用户,然后根据电表数据核算电费。UEI 将赋予其更多内涵,如电动汽车充换电服务等。

c. 营销模式。传统电力行业的营销模式主要是围绕电价展开,以制定电价政策的方式为主,如分时电价、阶梯电价等。未来随着电力市场趋于成熟,电价将由市场决定,为了继续保证客户粘性,企业应调整自己的战略重心。

3 关键技术

为了更好地进行 UEI 的建设,针对性地解决建设过程中不可避免的诸如分布式能源大规模接入、多源信息处理、多网规划、多源协调控制等技术问题,需要加深对以下 4 种关键技术的研究,推动其不断发展完善。

a. 元器件建模技术:电源模型包括冷热电联产机组^[57]、天然气发电系统、风力发电系统、光伏发电系统等模型;储能模型包括 P2G、电转氢^[58]、飞轮储能^[59]、蓄电池储能、蓄热蓄冷等模型;考虑源荷二重性及移动特性的电动汽车建模;微电网、虚拟电厂^[60-61]等独立网络形式建模;智能电力电子设备建模^[62]。

b. 综合规划技术:基于地理信息数据、电动汽车出行数据、历史用电数据、电力市场数据等信息的负荷预测技术^[63];基于天然气储量数据、风光资源数据等信息的资源评估技术;网络拓扑分析技术^[64],帮助分析微电网、虚拟电厂、电气化交通网等城市网络拓扑结构;科学合理的方案评估技术;基于多源数据融合等信息技术的综合能源信息网络建设。

c. 协调优化控制技术:基于信号反馈的闭环控制技术;实现能源系统“区域自治,全局协调”的分层分区协调控制技术^[65];应用于含分布式电源微电网的多代理协同控制技术^[66];应用于微电网的并网控制技术^[67];对信息进行处理分析评估,实现状态预警及辅助决策功能的态势感知技术^[68-69]。

d. 运营技术:大数据分析技术^[70],涵盖了数据采集、数据识别、数据挖掘、数据分析等环节,为商业运营提供数据支持;加强用户与能源系统间交流的信息交互技术;方便用户随时对大量数据进行上传或调用的云存储技术;通过激励手段使用户主动

改变用能方式的需求侧响应技术。

综上所述,UEI 关键技术的具体内涵及交互关系示意图如图 2 所示。规划阶段:利用综合规划技术来指导 UEI 的建设,包括能源网络及信息网络。运行阶段:在各类局域能源网内部,元器件建模技术是各种能量生产转换的基础;在各类局域能源网络之间,协调优化控制技术促成了多源协作和多网联合的顺利进行。这些技术为运营环节提供保障,而信息通信技术充分调动了用户参与能源交易的积极性。最后又通过需求侧响应技术,将影响反馈回系统规划、能量生产和运行控制环节。这几类关键技术之间彼此联系、相互支持,共同构成了 UEI 的关键技术体系。

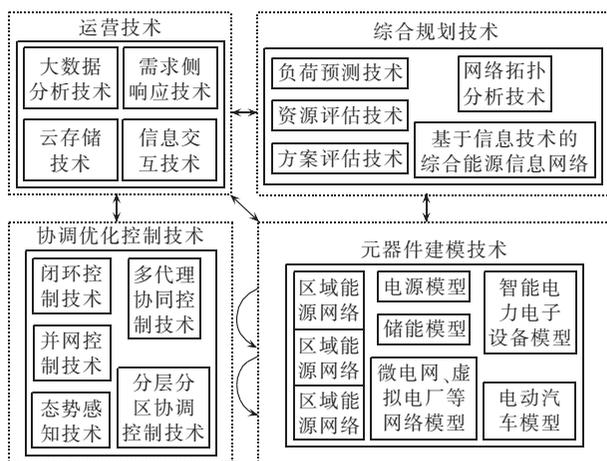


图 2 UEI 关键技术

Fig.2 Key technologies of UEI

4 发展趋势和研究展望

在 UEI 现有研究情况和关键技术发展现状的基础上,结合示范工程的实践经验,本文从设备形态、系统规划、运行控制、商业运营和协同发展 5 个方面进行展望,并提出了未来 UEI 的若干研究方向,以供探讨。

4.1 设备形态

未来 UEI 的设备应尽可能具备物理信息强耦合特性,既能承担物理层面上的能量生产、传输、转换、分配的任务,又能实现信息识别、采集、处理、反馈等功能。类比电力系统,未来能源系统在发、输、配、用、储等环节都需要大量新型信息物理设备的支持。在能量生产侧,未来综合能源信息网络系统将承担制定能源生产计划的任务。利用信息技术,获取用户综合用能需求和不同能源网络的生产能力,并将两者进行匹配,形成能源生产计划并发送给各个网络的生产控制中心。在能量传输过程中,需要能量路由器的参与^[11,71-73]。能量路由器可以实现不同网络之间能量的双向流动和网络潮流的灵

活控制。在能源转换过程中,则需要能量枢纽的参与^[74-75]。能量枢纽是在现有的能源转换技术基础上发展而来的,如光伏发电技术、冷热电联产技术、P2G技术等。目前美国及瑞士开展的区域综合能源系统研究项目的核心即能量枢纽,其在能量枢纽的建模及应用等方面取得了一定的成果^[76-78]。在能量的利用环节,未来强调的是兼顾用户经济效益和用能需求的智能用电管理设备,如智能楼宇等。

UEI 元器件建模过程中,应考虑到多源、多时间尺度、多重不确定性、动态等特性。其中,多源是指 UEI 设备的输入端可以是多种不同的能源;多时间尺度是指不同能量在转化效率等方面存在差异,如气热转变过程的时间系数相较于电转变过程的时间系数很大,不同时间尺度使得能量转换过程无法保证实时平衡;多重不确定性是指 UEI 设备广泛应用于能源生产的各个环节,这些环节中存在着大量的不确定性因素,包括连续的、非连续的、时变的、非时变的,使得对设备模型描述更加复杂;动态是指能量转换过程通常还伴随着一系列基于时间序列的系数变动。因此如何在多源、多时间尺度、多重不确定性下进行元器件的动态能量建模,如何实现元器件建模到 UEI 全网络建模的映射,如何在多尺度下进行综合能源网络的仿真都是未来 UEI 设备建模方面的关键科学问题。此外,电力电子器件的发展是实现设备形态转变的基础,未来电力电子器件将朝着精细化、智能化、标准化方向发展。

4.2 系统规划

未来 UEI 将形成一个超大型复杂网络,城市网络结构在不同场景、不同地区背景下发展出诸多不同拓扑特性的网络结构。当前城市传统能源网络都是独立规划的,造成了资源利用效率低,未来应该立足全局,统筹城市能源,对旧网进行改造重构再利用,以城市电网为核心,实现多网协调规划,提高不同时间、空间尺度下的能源调配能力,满足市民多样化用能需求,实现社会效益与经济效益的最大化。此外,UEI 的规划还需要因地制宜,当前我国城市布局大致有环状分布、带状分布、块状分布等,城市类型分为交通枢纽型、经济贸易型、传统工业型等,应基于城市布局与城市类型进行规划设计,使建设方案更加科学合理。从宏观层面考虑,城市与城市之间的资源情况不同,在规划初期可以将周边其他 UEI 的建设情况作为参考,通过多城合作,最终实现双赢或多赢局面。

UEI 面对的负荷类型更加多样,负荷预测的难度更高,如何基于电动汽车的时空特性及交通流等因素进行电动汽车充放电负荷建模预测、如何科学分析多种关联因素下的电动汽车规模增长情况等

都是未来的研究趋势及难点;进行能源信息的综合规划时,需要考虑异构网络在时间尺度上的差异这一特点,因此如何进行多网的协同优化、如何实现异构网络的信息无阻共享、如何保证一二次设备在时延情况下正常工作也是未来的研究方向;UEI 体现出多层次、多结构、多维度的特性,目前针对单一网络的分析评估方法无法适用于多源网络,因此如何综合现有分析评估方法提出一套全面标准的指标体系及相应的评估手段同样是未来 UEI 系统规划亟待解决的问题。

4.3 运行控制

未来 UEI 更适合采取分散集中式能量管理模式。围绕不同能源中心形成广泛分散的区域能源模块,再通过并网控制技术和分层分区协调控制技术,使区域网与区域网、区域网与主网之间互联通信,实现“区域自治,全局协调”。当主网发生故障时,利用大量分散的储能装置以及直流输电装置实现网络解耦,减小电网故障波及面积^[79-80];面对不确定性因素导致的小概率安全故障,可以利用多能互补的特性,实现多能多网互为备用,避免为了保证短时间内线路的抗压能力而盲目增大系统安全裕度的做法。

未来 UEI 运行控制方面的研究将集中于探讨多源异构能源网在不同时间尺度下的协调控制方式以及如何实现多主体之间的自组织控制。此外,UEI 的运行过程中存在着类型多样的不确定性因素,并且这些因素间还存在着复杂的关联关系,如何在这些不确定性因素的干扰下保证系统的稳定运行也是值得研究的问题。

4.4 商业运营

UEI 这一概念的出现不仅推动了相关技术的发展,也极大地刺激了能源行业商业模式的改革与创新,未来 UEI 可能从以下 7 个方面转变。

a. 商业理念。未来企业将调整战略,从以价格为导向转变为以服务为导向,需求侧响应将成为公司业务的重要发展方向之一。在多能源交易市场中,利用价格信号引导用户调整其用能方式,从而充分挖掘用户侧调节潜力,实现峰能需求转移,保证多种能源的供需协调优化,提高综合能源利用效率,平抑多能源市场价格波动,最终提升企业与用户的经济效益。以用户和电网公司签订的可中断远期合约为例,当网络出现供需不平衡时,企业可以切断部分用户负荷以保证网络平稳运行和电力市场稳定,提高网络灵活性,而用户可以根据合约从中获取收益,实现双赢。

b. 交易主体。未来将形成不同主体共同参与市场竞争的局面。以电能为例,随着电改政策的落

实,大量售电公司将成立,从而扩大了市民购电的选择空间。此外,普通市民除了作为能源消费者以外,还能扮演能源生产者,通过智能电表、智能家居、家庭储能等手段,参与能源交易。

c. 能源商品。未来能源商品将不仅仅是电能,还包括天然气、热能和储能等。其次,电动汽车、家庭储能等可控资源也将成为一种重要的商品。

d. 能源市场。为了活跃能源交易市场,未来可能出现能源期货市场。此外还会依据不同能源特性衍生出辅助服务市场和碳交易市场等。辅助服务市场作为电能交易市场的补充,保证电能系统的安全稳定运行;碳交易市场以节能减排为目的,有助于引导能源交易朝着低碳化、清洁化、可持续化方向发展。UEI 背景下的未来能源交易市场如图 3 所示。

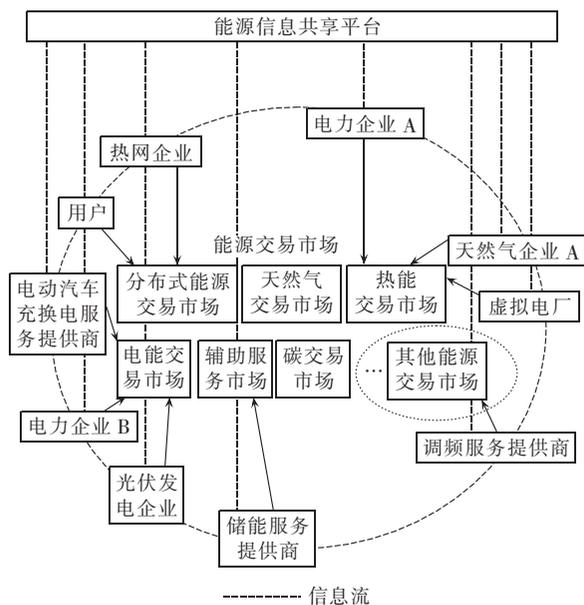


图 3 未来能源交易市场

Fig.3 Future energy trading market

e. 数据信息。在传统能源交易中,一方面由于信息不公开、不透明,用户对能源生产消费情况知之甚少,企业和用户掌握的信息不对等,使得用户处于弱势地位,只能被动地消费能源;另一方面,能源企业空有大量数据,却没有合理利用,造成大量数据闲置浪费。信息网络对能源信息的及时共享有助于提高用户参与交易的积极性;通过大数据技术,能源企业可以从用户数据中分析出用户的用能习惯,从而为用户定制用能计划,提供优质贴心的能源服务,实现“比特管理瓦特”,从而在竞争激烈的市场环境下掌握主动权。

f. 营销手段。UEI 背景下的能源营销手段将更丰富多彩:能源网购,开放的即时能源交易平台;众筹能源,集合游离资本进行小规模新能源开发;电动汽车后市场服务,以调峰调频为目的的规模化电

动汽车的充换电策略制定;能源咨询,为企业或个人定制私人化能源消费方案;共享电动汽车,借鉴现今流行的“共享单车”概念,在部分重要道路路口提供公共电动汽车租赁服务;能源交易所,帮助进行能源期货及能源资产的交易和运作。

g. 交易模式。未来能源交易过程也是博弈的过程。良好健康的市场交易应尽量减少政府的干预,交易主体多元化的同时,也产生了交易主体之间的信任问题,能源市场缺少一个值得信任的中心来帮助减少交易摩擦。

未来能源交易市场将呈现百花齐放的局面,然而目前的研究仍存在许多问题亟待解决,如保证能源交易市场可持续发展的市场机制问题、避免恶性竞争的市场监督问题、解决不信任情况下的用户交易问题、防止数据泄露和数据滥用的数据安全等问题等^[81]。区块链技术去中心化与安全可信的特征使得其具有解决这些问题的能力,因此如何将区块链技术与能源市场交易相结合,建立一个值得信任的市场环境是未来值得研究的方向之一。

4.5 UEI 与其他政策、概念的联动发展

a. 电改政策驱动下的 UEI 发展。

UEI 的发展建设是一个长期的过程,在该过程中政策起到了很大的作用。电力网络是 UEI 的核心部分,电力行业在发、输、配、售 4 个环节的改革具有长期性,将会驱动 UEI 的发展。一方面,发电环节的放开改变了以集中型火电为主的生产方式,通过政策支持和政府补贴等行为鼓励分布式能源以及热电联产等生产方式,使能源网络更加开放包容,有助于打破能源与能源之间、网络与网络之间的壁垒,为 UEI 的多能互联、多网融合奠定基础。另一方面,售电侧改革的不断推进,使售电市场成为了孕育新型商业模式的沃土。改革使得分布式能源以微电网或虚拟电厂等形式与传统电厂共同竞价上网成为可能;电能交易不再局限于发电厂-电网-用户,将产生如 B2B 形式的大用户直购、B2C 形式的跨区平衡调度、C2C 形式的微电网就地平衡、C2B 形式的虚拟电厂参与电力市场等交易模式,这些多样化的电力交易将组成 UEI 的早期能源市场。

b. 智慧城市驱动下的 UEI 发展。

智慧城市是利用信息通信技术,收集、处理、分析整个城市各个核心系统的数据,从而更好地服务市民。它要求最终实现城市的可持续性发展。UEI 与智慧城市有着诸多共性:智慧城市将打通医疗、教育、能源、交通等多个领域的信息通道,实现信息共享,而 UEI 同样要实现能源生产各环节的无障碍通信;智慧城市和 UEI 的发展都依赖于大量智能量测装置和传感器;智慧城市低碳生活的理念也会极

大地促进清洁能源的开发;同时利用智慧城市多业务领域的用户数据,将帮助 UEI 进行更精确的负荷预测和需求侧管理。UEI 是智慧城市的重要建设内容之一,而智慧城市的发展同样有助于加快 UEI 的建设,两者相辅相成。

5 结语

UEI 是一场能源信息革命,它的出现将推动城市能源供应体系的结构性改革和能源产业升级,其打破了能源集中式生产的模式,使能源生产分散化、清洁化、智能化,引入大数据技术,围绕需求侧,不断催生新的商业模式,打造城市能源生态系统。

本文通过比对现有文献中的观点,给出了 UEI 的概念,同时总结了其五大核心特征:多能耦合、多网融合,设备多样、场景复杂,交互频繁、规模量大,互联互通、便捷互动,优质服务、经济运行。从规划、运行和运营 3 个方面归纳分析了 UEI 建设对电力系统的影响,旨在为未来的电网改造工作提供一定的参考,并提出了 UEI 关键技术体系,包括元器件建模技术、综合规划技术、协调优化控制技术、运营技术。最后探讨了 UEI 设备形态、系统规划、运行控制、商业模式和协同发展 5 个方面,并在此基础上提供了若干未来 UEI 的研究思路,希望本文的工作能为后续相关的研究工作提供一定帮助。

参考文献:

- [1] 吉平,周孝信,宋云亭,等. 区域可再生能源规划模型述评与展望[J]. 电网技术,2013,37(8):2071-2079.
JI Ping,ZHOU Xiaoxin,SONG Yunting,et al. Review and prospect of regional renewable energy planning models[J]. Power System Technology,2013,37(8):2071-2079.
- [2] 王成山,武震,李鹏. 微电网关键技术研究[J]. 电工技术学报,2014,29(2):1-12.
WANG Chengshan,WU Zhen,LI Peng. Research on key technologies of microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2014,29(2):1-12.
- [3] OLIVARES D E,MEHRIZI-SANI A,ETEMADI A H,et al. Trends in microgrid control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2014,5(4):1905-1919.
- [4] RIFKIN J. The third industrial revolution:how lateral power is transforming energy,the economy,and the world[M]. New York, USA:Palgrave Macmillan,2011:74-112.
- [5] 谢开,刘明志,于建成. 中新天津生态城智能电网综合示范工程[J]. 电力科学与技术学报,2011,26(1):43-47.
XIE Kai,LIU Mingzhi,YU Jiancheng. Summary on smart grid integrated demonstration project of Sino-Singapore Tianjin eco-city[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2011,26(1):43-47.
- [6] 于建成,王旭东,张东,等. 面向多元能源互联的天津生态城智能电网创新示范区建设[J]. 电力建设,2015,36(11):58-63.
YU Jiancheng,WANG Xudong,ZHANG Dong,et al. Innovation demonstration area construction of Tianjin eco-city smart grid facing multi energy interconnection[J]. Electric Power Construction,2015,36(11):58-63.
- [7] KRENCE J,SCHEIBMAYER M,DEINDL M. Identification scheme and name service in the internet of energy[C]//Innovative Smart Grid Technologies(ISGT),2013 IEEE PES. Vancouver,Canada: IEEE,2013:1-6.
- [8] VERMESAN O,BLYSTAD L C,ZAFALON R,et al. Internet of energy connecting energy anywhere anytime[M]. Berlin,Germany: Springer,2011:33-48.
- [9] Federation of German Industries. Internet of energy:ICT for energy markets of the future:BDI 439[R]. Berlin,Germany: Federation of German Industries,2008.
- [10] 何湘宁,宗升,吴建德,等. 配电网电力电子装备的互联与网络化技术[J]. 中国电机工程学报,2014,34(29):5162-5170.
HE Xiangning,ZONG Sheng,WU Jiande,et al. Technologies of power electronic equipment interconnecting and networking in distribution grids[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(29): 5162-5170.
- [11] HUANG A Q. FREEDM system—a vision for the future grid [C]//Proceedings of the 2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting. Minneapolis,MN,USA:IEEE,2010:1-4.
- [12] 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.
- [13] AKELLA R,MENG F,DITCH D,et al. Distributed power balancing for the FREEDM system[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Smart Grid Communications. Gaithersburg,MD,USA:IEEE,2010:7-12.
- [14] 张小平,李佳宁,付灏. 配电网能源互联网:从虚拟电厂到虚拟电力系统[J]. 中国电机工程学报,2015,35(14):3532-3540.
ZHANG Xiaoping,LI Jianing,FU Hao. Distribution power & energy internet:from virtual power plants to virtual power systems[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(14):3532-3540.
- [15] 杨毅,雷霞,叶涛,等. 考虑安全性与可靠性的微电网电能优化调度[J]. 中国电机工程学报,2014,34(19):3080-3088.
YANG Yi,LEI Xia,YE Tao,et al. Microgrid energy optimal dispatch considering the security and reliability[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(19):3080-3088.
- [16] 赵慧颖,刘广一,贾宏杰,等. 基于精细化模型的需求侧响应策略分析[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(1):62-69.
ZHAO Huiying,LIU Guangyi,JIA Hongjie,et al. Analysis of demand response program based on refined models[J]. Power System Protection and Control,2014,42(1):62-69.
- [17] 严太山,程浩忠,曾平良,等. 能源互联网体系架构及关键技术[J]. 电网技术,2016,40(1):105-113.
YAN Taishan,CHENG Haozhong,ZENG Pingliang,et al. System architecture and key technologies of energy internet[J]. Power System Technology,2016,40(1):105-113.
- [18] 田世明,栾文鹏,张东霞,等. 能源互联网技术形态与关键技术[J]. 中国电机工程学报,2015,35(14):3482-3494.
TIAN Shiming,LUAN Wenpeng,ZHANG Dongxia,et al. Technical forms and key technologies on energy internet[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(14):3482-3494.

- [19] 刘东, 盛万兴, 王云, 等. 电网信息物理系统的关键技术及其进展[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3522-3531.
LIU Dong, SHENG Wanxing, WANG Yun, et al. Key technologies and trends of cyber physical system for power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3522-3531.
- [20] SALAHUDDIN M, ALAM K. Internet usage, electricity consumption and economic growth in Australia: a time series evidence[J]. Telematics and Informatics, 2015, 32(4): 862-878.
- [21] SCHNEIDER L, KÖTTER E. The geographic potential of power-to-gas in a German model region-trier-amprion 5[J]. Journal of Energy Storage, 2015, 1(1): 1-6.
- [22] SCHIEBAHN S, GRUBE T, ROBINIUS M, et al. Power to gas: technological overview, systems analysis and economic assessment for a case study in Germany[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(12): 4285-4294.
- [23] 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.
- [24] 刘晓飞, 张千帆, 崔淑梅. 电动汽车 V2G 技术综述[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 121-127.
LIU Xiaofei, ZHANG Qianfan, CUI Shumei. Review of electric vehicle V2G technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 121-127.
- [25] KEMPTON W, TOMIC J. Vehicle-to-grid power fundamentals: calculating capacity and net revenue[J]. Journal of Power Sources, 2005, 144(1): 268-279.
- [26] SAUER D U, KLEIMAIER M, GLAUNSINGER W. Relevance of energy storage in future distribution networks with high penetration of renewable energy sources[C]//20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution-part 1, 2009. Prague, Czech Republic: IET, 2009: 1-4.
- [27] 熊燕, 刘鑫, 马胜红. 中国城市规模化光伏发电应用条件分析[J]. 可再生能源, 2012(1): 123-126.
XIONG Yan, LIU Xin, MA Shenghong. Application condition analysis for scaled PV power generation in urban area of China[J]. Renewable Energy Resources, 2012(1): 123-126.
- [28] 高峰, 孙成权. 我国太阳能开发利用的现状与建议[J]. 能源工程, 2000(5): 8-11.
GAO Feng, SUN Chengquan. Suggestions on and current status of solar energy utilization in China[J]. Energy Engineering, 2000(5): 8-11.
- [29] 靳静, 顾承红, 艾芊, 等. 城市光伏建筑一体化[J]. 电器与能效管理技术, 2007(8): 47-50.
JIN Jing, GU Chenghong, AI Qian, et al. Building integrated photovoltaics of city[J]. Electrical and Energy Management Technology, 2007(8): 47-50.
- [30] PAOLETTI S, CASINI M, GIANNITRAPANI A, et al. Load forecasting for active distribution networks[C]//2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe). Manchester, UK: IEEE, 2011: 1-6.
- [31] 曾鸣, 李娜, 王涛, 等. 兼容需求侧资源的负荷预测新方法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(10): 59-62, 73.
ZENG Ming, LI Na, WANG Tao, et al. Load forecasting compatible with demand-side resources[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(10): 59-62, 73.
- [32] PAOLETTI S, VICINO A, ZIMA M, et al. Forecasting and validation tools for distribution networks with active demand[C]//2012 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON 2012). Florence, Italy: IEEE, 2012: 641-646.
- [33] 曾鸣, 武庚, 王昊婧, 等. 智能用电背景下考虑用户满意度的居民需求侧响应调控策略[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 2917-2923.
ZENG Ming, WU Geng, WANG Haojing, et al. Regulation strategies of demand response considering user satisfaction under smart power background[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 2917-2923.
- [34] MARTINS V F, BORGES C L T. Active distribution network integrated planning incorporating distributed generation and load response uncertainties[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(4): 2164-2172.
- [35] MEHDI J, KAZEM Z, TARAFDAR H M. Dynamic expansion planning of sub-transmission substations and defining the associated service area[J]. Electric Power Systems Research, 2014, 116(116): 218-230.
- [36] 唐念, 夏明超, 肖伟栋, 等. 考虑多种分布式电源及其随机特性的配电网多目标扩展规划[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(8): 45-52.
TANG Nian, XIA Mingchao, XIAO Weidong, et al. Multi-objective expansion planning of active distribution systems considering distributed generator types and uncertainties[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(8): 45-52.
- [37] 白牧可, 唐巍, 张璐, 等. 基于机会约束规划的 DG 与配电网架多目标协调规划[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 346-354.
BAI Muke, TANG Wei, ZHANG Lu, et al. Multi-objective coordinated planning of distribution network incorporating distributed generation based on chance constrained programming[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 346-354.
- [38] UNSIHUAY-VILA C, MARANGON-LIMA J W, DE-SOUZA A C Z, et al. A model to long-term, multiarea, multistage, and integrated expansion planning of electricity and natural gas systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(2): 1154-1168.
- [39] CHAUDRY M, JENKINS N, STRBAC G. Multi-time period combined gas and electricity network optimisation[J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78(7): 1265-1279.
- [40] 姚伟锋, 赵俊华, 文福拴, 等. 配电系统与电动汽车充电网络的协调规划[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 10-18.
YAO Weifeng, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. Coordinated planning for power distribution system and electric vehicle charging infrastructures[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 10-18.
- [41] LIN X N, SUN J W, AI S F, et al. Distribution network planning integrating charging stations of electric vehicle with V2G[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 63: 507-512.
- [42] 殷晓刚, 戴冬云, 韩云, 等. 交直流混合微网关键技术研究[J].

- 高压电器,2012,48(9):43-46.
- YIN Xiaogang,DAI Dongyun,HAN Yun,et al. Discussion on key technologies of AC-DC hybrid microgrid[J]. High Voltage Apparatus,2012,48(9):43-46.
- [43] 丁明,罗魁,毕锐. 孤岛模式下基于多代理系统的微电网能量协调控制策略[J]. 电力系统自动化,2013,37(5):1-8.
- DING Ming,LUO Kui,BI Rui. An energy coordination control strategy for islanded microgrid based on a multi-agent system[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(5):1-8.
- [44] 丁明,马凯,毕锐. 基于多代理系统的多微电网能量协调控制[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(24):1-8.
- DING Ming,MA Kai,BI Rui. Energy coordination control of multi-microgrid based on multi-agent system[J]. Power System Protection and Control,2013,41(24):1-8.
- [45] 张大鹏,徐涛,魏志成,等. 交直流混合微电网能量管理策略研究[J]. 煤矿机电,2014,34(5):10-17.
- ZHANG Dapeng,XU Tao,WEI Zhicheng,et al. Research on energy management strategy of AC/DC hybrid micro grid[J]. Colliery Mechanical & Electrical Technology,2014,34(5):10-17.
- [46] 荆有印,白鹤,张建良. 太阳能冷热电联供系统的多目标优化设计与运行策略分析[J]. 中国电机工程学报,2012,32(20):82-87.
- JING Youyin,BAI He,ZHANG Jianliang. Multi-objective optimization design and operation strategy analysis of a solar combined cooling heating and power system[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(20):82-87.
- [47] 马玲玲,杨军,付聪,等. 电动汽车充放电对电网影响研究综述[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(3):140-148.
- MA Lingling,YANG Jun,FU Cong,et al. Review on impact of electric car charging and discharging on power grid[J]. Power System Protection and Control,2013,41(3):140-148.
- [48] 占恺峤,胡泽春,宋永华,等. 含新能源接入的电动汽车有序充电分层控制策略[J]. 电网技术,2016,40(12):3689-3695.
- ZHAN Kaiqiao,HU Zechun,SONG Yonghua,et al. Electric vehicle coordinated charging hierarchical control strategy considering renewable energy generation integration[J]. Power System Technology,2016,40(12):3689-3695.
- [49] 朱兰,严正,杨秀,等. 计及需求侧响应的微网综合资源规划方法[J]. 中国电机工程学报,2014,34(16):2621-2628.
- ZHU Lan,YAN Zheng,YANG Xiu,et al. Integrated resources planning in microgrid based on modeling demand response[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(16):2621-2628.
- [50] 卫志农,张思德,孙国强,等. 计及电转气的电-气互联综合能源系统削峰填谷研究[J/OL]. 中国电机工程学报,[2017-03-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2017.TM.20170303.1252.009.html>. DOI:10.1334/j0258-8013.pcsee.161361.
- WEI Zhinong,ZHANG Side,SUN Guoqiang,et al. Power-to-gas considered peak load shifting research for integrated electricity and natural-gas energy systems[J/OL]. Proceedings of the CSEE,[2017-03-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2017.TM.2017-0303.1252.009.html>. DOI:10.1334/j0258-8013.pcsee.161361.
- [51] 王昌照,汪隆君,王钢,等. 分布式电源出力与负荷相关性对配电网可靠性的影响分析[J]. 电力自动化设备,2015,35(6):99-105.
- WANG Changzhao,WANG Longjun,WANG Gang,et al. Impact of distributed generation output and load correlation on distribution network reliability[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(6):99-105.
- [52] 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)[J]. 电网技术,2015,39(11):3047-3053.
- CHEN Qixin,LIU Dunnan,LIN Jin,et al. Business models and market mechanisms of energy internet(I)[J]. Power System Technology,2015,39(11):3047-3053.
- [53] 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)[J]. 电网技术,2015,39(11):3057-3063.
- LIU Dunnan,ZENG Ming,HUANG Renle,et al. Business models and market mechanisms of energy internet(2)[J]. Power System Technology,2015,39(11):3057-3063.
- [54] 江亿,付林. 城市天然气采暖的新途径[J]. 中国能源,2001(6):8-12.
- JIANG Yi,FU Lin. A new approach of city heating using natural gas[J]. China Energy,2001(6):8-12.
- [55] 项顶,胡泽春,宋永华,等. 通过电动汽车与电网互动减少弃风的商业模式与日前优化调度策略[J]. 中国电机工程学报,2015,35(24):6293-6303.
- XIANG Ding,HU Zechun,SONG Yonghua,et al. Business model and day-ahead dispatch strategy to reduce wind power curtailment through vehicle-to-grid[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(24):6293-6303.
- [56] 刘继东,韩学山,韩伟吉. 分时电价下用户响应行为的模型与算法[J]. 电网技术,2013,37(10):2973-2978.
- LIU Jidong,HAN Xueshan,HAN Weiji. Model and algorithm of customers responsive behavior under time-of-use price[J]. Power System Technology,2013,37(10):2973-2978.
- [57] 郭平生,唐贤健,潘士虎,等. 冷热电联产中带抽燃气微型燃气轮机的建模与仿真[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2010,34(6):1293-1296.
- GUO Pingsheng,TANG Xianjian,PAN Shihu,et al. Modeling and simulation of the microturbine with extraction gas in combined cool heat and power[J]. Journal of Wuhan University of Technology(Transportation Science & Engineering),2010,34(6):1293-1296.
- [58] MOSKALENKO N,LOMBARDI P,KOMARNICKI P. Multi-criteria optimization for determining installation locations for the power-to-gas technologies[C]//2014 IEEE PES General Meeting Conference & Exposition. Washington D C,USA:IEEE,2014:1-5.
- [59] 周龙,齐智平. 解决配电网电压暂降问题的飞轮储能单元建模与仿真[J]. 电网技术,2009,33(19):152-158.
- ZHOU Long,QI Zhiping. Modeling and simulation of flywheel energy storage unit for voltage sag in distribution network[J]. Power System Technology,2009,33(19):152-158.
- [60] 卫志农,余爽,孙国强,等. 虚拟电厂的概念与发展[J]. 电力系统自动化,2013,37(13):1-9.
- WEI Zhinong,YU Shuang,SUN Guoqiang,et al. Concept and development of virtual power plant[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(13):1-9.
- [61] 陈春武,李娜,钟朋园,等. 虚拟电厂发展的国际经验及启示[J]. 电网技术,2013,37(8):2258-2263.
- CHEN Chunwu,LI Na,ZHONG Pengyuan,et al. Review of virtual power plant technology abroad and enlightenment to China[J]. Power System Technology,2013,37(8):2258-2263.
- [62] 刘国旺,张顺彪,吴奕,等. 逆变电源建模仿真与控制策略优化

- 设计[J]. 机车电传动, 2015(5):19-22.
- LIU Guowang,ZHANG Shunbiao,WU Yi,et al. Simulation and control optimization design for inverter power supply[J]. Electric Drive for Locomotives,2015(5):19-22.
- [63] 罗凤章. 现代配电系统评价理论及其综合应用[D]. 天津:天津大学,2010.
- LUO Fengzhang. Evaluation theories on modern distribution systems and its comprehensive applications[D]. Tianjin:Tianjin University,2010.
- [64] 韩国政,邱洪泽. 面向间隔的电力网络拓扑分析方法[J]. 电力系统自动化,2006,30(13):59-63.
- HAN Guozheng,QIU Hongze. Novel voltage control strategy to improve the dynamic performances of active power filter[J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(13):59-63.
- [65] 郭红霞,吴捷,刘永强. 基于多 Agent 系统的分层分布式电压无功协调控制系统[J]. 电网技术,2007,31(2):16-21.
- GUO Hongxia,WU Jie,LIU Yongqiang. Voltage and reactive power coordinated control system of hierarchical and distributed structure based on multi-Agent system[J]. Power System Technology,2007,31(2):16-21.
- [66] 孙秋野,滕菲,张化光,等. 能源互联网动态协调优化控制体系构建[J]. 中国电机工程学报,2015,35(14):3667-3677.
- SUN Qiuye,TENG Fei,ZHANG Huaguang,et al. Construction of dynamic coordinated optimization control system for energy internet[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(14):3667-3677.
- [67] 陈燕东,罗安,周乐明,等. 一种功率前馈的鲁棒预测无差拍并网控制方法[J]. 中国电机工程学报,2013,33(36):62-70.
- CHEN Yandong,LUO An,ZHOU Leming,et al. A robust predictive deadbeat grid-connected control method based on power feed-forward control[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(36):62-70.
- [68] LEITE J B,MANTOVANI J R S. Distribution system state estimation using the Hamiltonian cycle theory[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2016,7(1):366-375.
- [69] 杨胜春,汤必强,姚建国,等. 基于态势感知的电网自动智能调度架构及关键技术[J]. 电网技术,2014,38(1):33-39.
- YANG Shengchun,TANG Biqiang,YAO Jianguo,et al. Architecture and key technologies for situational awareness based automatic intelligent dispatching of power grid[J]. Power System Technology,2014,38(1):33-39.
- [70] 孙鹏,李剑,张劲,等. 基于 Markov 过程的输变电设备一体化智能监测装置可靠性评估[J]. 高电压技术,2015,41(12):3952-3958.
- SUN Peng,LI Jian,ZHANG Jing,et al. Markov process based reliability model for integrated intelligent monitoring device of power transmission and transformation equipment[J]. High Voltage Engineering,2015,41(12):3952-3958.
- [71] 郭慧,汪飞,张笠君,等. 基于能量路由器的智能型分布式能源网络技术[J]. 中国电机工程学报,2016,36(12):3314-3324.
- GUO Hui,WANG Fei,ZHANG Lijun,et al. Technologies of energy router-based smart distributed energy network[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(12):3314-3324.
- [72] 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[J]. 电网技术,2015,39(11):3094-3101.
- CAO Yang,YUAN Liqiang,ZHU Shaomin,et al. Parameter design of energy router orienting energy internet[J]. Power System Technology,2015,39(11):3094-3101.
- [73] 盛万兴,刘海涛,曾正,等. 一种基于虚拟电机控制的能量路由器[J]. 中国电机工程学报,2015,35(14):3541-3550.
- SHENG Wanxing,LIU Haitao,ZENG Zheng,et al. An energy hub based on virtual-machine control[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(14):3541-3550.
- [74] 王毅,张宁,康重庆. 能源互联网中能量枢纽的优化规划与运行研究综述及展望[J]. 中国电机工程学报,2015,35(22):5669-5681.
- WANG Yi,ZHANG Ning,KANG Chongqing. Review and prospect of optimal planning and operation of energy hub in energy internet[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(22):5669-5681.
- [75] FAVRE-PERROD P. A vision of future energy networks[C]// 2005 IEEE Power Engineering Society Inaugural Conference and Exposition in Africa. Durban,South Africa:IEEE,2005:13-17.
- [76] QUELHAS A,GIL E,MCCALLEY J D,et al. A multiperiod generalized network flow model of the U.S. integrated energy system:part I-model description[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2007,22(2):829-836.
- [77] QUELHAS A,MCCALLEY J D. A multiperiod generalized network flow model of the U.S. integrated energy system:part II-simulation results[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2007,22(2):837-844.
- [78] GEIDL M. Integrated modeling and optimization of multicarrier energy systems[D]. Zurich,Switzerland:ETH Zurich,2007.
- [79] LOH P C,LI D,CHAI Y K,et al. Hybrid AC-DC microgrids with energy storages and progressive energy flow tuning[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2013,28(4):1533-1543.
- [80] 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 equipment for future energy internet[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(15):3760-3769.
- [81] 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):1109-1126.
- WANG Jiye,MENG Kun,CAO Junwei,et al. Information technology for energy internet:a survey[J]. Journal of Computer Research and Development,2015,52(5):1109-1126.

作者简介:



洪居华

洪居华(1994—),男,福建福州人,硕士研究生,主要研究方向为能源互联网、电动汽车与电力系统交互影响分析(**E-mail**: 742475603@qq.com);

刘俊勇(1963—),男,四川成都人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力市场、电力系统稳定与控制、分布式发电及智能电网(**E-mail**: liujy@scu.edu.cn);

向月(1987—),男,重庆人,副研究员,博士,通信作者,主要研究方向为电动汽车、主动配网规划与运行(**E-mail**: xiang@scu.edu.cn)。

Preliminary understanding and research prospect of urban energy internet

HONG Juhua, LIU Junyong, XIANG Yue, NIU Yi

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: UEI(Urban Energy Internet) can be used to realize the efficient conversion among multiple energy sources within urban area, such as wind, solar, cooling, thermal, electric, gas, storage, etc., and the deep integration of multiple networks, such as electric power, gas, electrified transportation, etc. A UEI concept integrating different viewpoints is given, the effects of UEI development on the power system are analyzed in the aspects of planning, operating and marketing, the research trends of UEI are summarized, a key technology system of UEI is proposed, including component modelling, comprehensive planning, coordinated optimal control and operation, and the development and research prospect of UEI is discussed in the aspects of equipment morphology, system planning, operational control, commercial mode and coordinated development.

Key words: urban energy internet; electric power systems; planning; operation; key technology system; commercial mode