

城市能源互联网的技术架构及在厦门市的实践探索

周敬东

(国网厦门供电公司, 福建 厦门 361000)

摘要: 城市能源互联网可以实现电力网络、天然气网络、电气化交通网络等多种网络的深度融合, 是未来城市能源系统转型和发展的方向。首先给出了城市互联网的定义, 并阐述了城市能源互联网的核心思想和基本特征。随后, 从运行、规划和运营的角度归纳分析了能源互联网的发展现状与面临的挑战。然后根据城市能源互联网互联互通的技术特点, 提出了传输层-信息层-价格层三位一体的城市能源互联网技术架构, 并对技术架构中涉及的规划、运行、运营和信息等相关技术的未来发展方向进行了分析。最后根据福建省厦门市终端能源网络特点, 对城市能源互联网进行了局部的规划和试点建设, 为下一步城市能源互联网的全面推广建设提供了建设蓝图。

关键词: 城市能源互联网; 技术架构; 运行; 规划; 运营

Technical framework of urban energy internet and its practical exploration in Xiamen city

ZHOU Jingdong

(State Grid Xiamen Electric Power Supply Company, Xiamen 361000, China)

Abstract: Urban energy internet can realize the deep integration of various networks such as power network, natural gas network and electrified transportation network, which is the direction of future urban energy system transformation and development. Firstly, the definition of urban internet is given, and the core idea and basic features of urban energy Internet are expounded. Then, the development status and challenges of energy internet are summarized and analyzed from the perspective of operation, planning and marketing. Then, according to the technical characteristics of urban energy internet interconnection, the urban energy internet technical framework of transport layer, information layer, and price layer is proposed, and future development direction of related technologies such as planning, operation, marketing and information involved in the technical framework is analyzed. Finally, according to the characteristics of the terminal energy network in Xiamen city, Fujian Province, urban energy Internet is partially planned and piloted, which provides a blueprint for the comprehensive promotion of the urban energy internet.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2014AA051901).

Key words: urban energy internet; technical framework; operation; planning; marketing

0 引言

近年来, 我国城镇化进程不断加快, 城市已经逐渐成为了能源消费的主要场所。2016年, 我国城市能源消费量占全国能源消费总量比例已超过80%^[1]。然而, 城市中电、气、热等各个能源子系统相互独立的供能模式和粗放的能源利用方式极大地制约了城市能源系统的发展, 其面临着能源供应结构不合理、能源综合利用效率低、可再生能源消

纳能力不足等问题。因此, 为了能够实现多种能源互补共济与高效利用, 提高供能的可靠性和经济性, 能源互联网技术应运而生^[2-4]。2011年美国学者杰里米·里夫金在《第三次工业革命》^[5]一书中率先提出了能源互联网的概念, 如今, 能源互联网已经得到了广泛的关注, 而城市地区作为区域的用能中心, 在城市地区构建城市能源互联网(Urban Energy Internet, UEI)对于推动城市、国家乃至整个社会的能源发展都具有积极的意义。

城市能源互联网通过高效的能量耦合设备, 实现多能源系统的互联, 通过不同能源形式间的协同转化提升城市对能源的综合利用效率^[6]; 同时将电

力网络、天然气网络、供暖网络等能源网络与信息网络进行深度融合^[7-9], 实现信息的开放共享。

能源互联网对比传统能源网络, 具有建设通道更集约、传送过程更安全、利用效率更高、能源生产消费更清洁以及能源生产传输成本更低等诸多优势, 已经得到了政府、能源供应商和能源消费用户的广泛认同。2016 年国网天津市电力公司发布了《天津城市能源互联网白皮书》, 提出了能源互联网的建设理念和基础架构, 2018 年 10 月, 国网厦门供电公司发布了《厦门城市能源互联网白皮书》, 进一步明确了能源互联网的建设目标、思路、技术架构和创新方向。

本文首先给出了城市能源互联网的初步定义, 阐述了城市能源互联网的核心思想和基本特征, 并从运行、规划和运营的角度归纳分析了城市能源互联网的发展现状与面临的挑战。然后根据城市能源互联互通的技术要求提出了城市能源互联网发展的技术架构, 并对技术架构中涉及的规划、运行和运营等的未来发展方向进行了分析。最后通过国网厦门供电公司在厦门市能源网络上的技术实践, 进一步论证并明确了城市能源互联网技术架构的可行性和先进性, 为国家电网公司能源互联网战略目标在城市的落地实践提供典型范例。

1 城市能源互联网的概念、核心思想与特征

目前城市能源互联网的概念和理解众多, 尚无统一的定义。文献[10]对能源互联网的概念进行了初步定义, 即能源互联网是以电力系统为核心, 以互联网技术和新能源发电技术为基础, 并结合了交通、天然气等系统构成的复杂多网流系统。文献[11]对城市能源互联网的共性特征进行了归纳总结, 即具有多能互联、广泛应用互联网技术和以电能为核心的特征。本文立足于国家电网公司能源互联网战略发展要求, 并结合现有文献对城市能源互联网概念的理解, 提出面向未来发展需求的城市能源互联网定义: 城市能源互联网是未来满足城市各类能源使用需求的能源系统, 是全球能源互联网、中国能源互联网在城市地区的承接节点和重要支撑, 是城市各类能源互联互通、综合利用、优化共享的平台, 具有跨域平衡、低碳化的核心思想以及网络化、清洁化、电气化、智能化的特征。

城市能源互联网的核心思想是以电为中心, 构建广泛互联、开放共享、再电气化、低碳环保的城市综合能源系统。

1) 以电为中心。将电网作为能源配置的基础平台, 促进多种能源(煤、油、气、风、光等)与电能

的有机融合。将提高电气化水平作为优化能源结构、提高能源效率的根本举措。

2) 广泛互联。以电力为中心, 通过创新能源转化技术, 实现电网、气网、热力网和交通网等多种能源体系间的互联互通, 构建支撑多种供能网络广泛耦合互联的综合能源供应体系。

3) 开放共享。开放新能源发电的接入标准和路径, 为各类需求供应商提供实时的网络运行信息和用户需求信息。为用电客户提供及时、透明的电网运行和实时电价等供电服务信息; 实现分布式电源、储能及电动汽车充放电设施的即插即用、灵活接入。

4) 再电气化。能源转型是社会化的系统工程, 其根本任务是构建清洁、低碳的新型能源体系, 根本途径是再电气化。

5) 低碳环保。在能源开发上, 风能、太阳能等清洁能源大规模应用, 以清洁能源替代化石能源, 实现以清洁能源为主导的城市供能结构。在能源利用上, 提高电能在终端能源中的比重, 更好地推动城市消费低碳化发展。

城市能源互联网的主要特征为网络化、清洁化电气化和智能化。

1) 网络化是城市能源互联网的基本形态。促成多种能源以电力为介质的有机融合, 具有系统优化与局部自治相得益彰的互联分层网络结构。

2) 清洁化是城市能源互联网的终极目标。推动光伏、风能、外来电力等清洁能源逐步取代化石能源, 有效降低化石能源使用比重。

3) 智能化是城市能源互联网的关键支撑。研发先进的信息通信、智能控制、友好互动技术, 实现城市能源的智能开发、传输和利用, 支撑智慧城市建设。

4) 电气化是城市能源互联网的重要手段。实现以电代煤、以电代油、以电代气, 提高能源使用的经济性、安全性、环保性和便捷性。

2 城市能源互联网发展现状与挑战

城市能源互联网是一个电、气、热等多能源网络与信息网络相耦合的系统, 是未来城市能源系统转型和发展的方向, 其涉及运行、规划和运营等多个层面。通过对城市能源互联网的发展现状与挑战进行归纳总结, 以期为国家未来的建设工作提供理论参考。

2.1 运行层面

UEI 的优化运行涉及元件建模、不确定性优化、多时间尺度特性建模等问题。现有建模主要是基于苏黎世联邦理工学院提出的能量枢纽模型^[12], 该模

型利用耦合矩阵来表示电、气、热等多种能源形式间的转化、存储、传输关系。文献[13-15]利用能量枢纽模型对居民区、商业楼宇、工厂的各种用电设备进行建模,并在考虑用户偏好和用能特点的同时,实现了整体供能成本的优化。文献[16]基于多个能量枢纽模型对配网进行建模,并从电力运营者的角度使日前调度计划达到最优。

能源互联网在生产、传输、转化和消费等各个环节都存在不确定性因素,在优化模型中合理地计及不确定性因素影响是十分必要的。文献[17-19]研究了分布式电源出力、能源需求、实时价格等不确定性因素对供用能策略和运行成本的影响,并提出了相应的鲁棒优化、随机优化模型。文献[20]在考虑需求侧、发电侧各参与方不同利益需求基础上,提出一种含主-从博弈的分布式能量管理模型,并将其融入到模型预测控制架构中,以有效应对可再生能源输出间歇性、波动性带来的不利影响。电动汽车作为未来城市电网中的重要参与元素,其充电需求特性会对运行造成一定的影响。文献[21]基于模糊理论研究了计及集群电动汽车充电负荷不确定性的电-气-热多能源系统协同优化调度问题,并分析了不同负荷充电模式和不同电动汽车接入数量下的调度策略及收益。文献[22-23]研究了电价驱动下的电动汽车充放电行为对于电网运行的影响。

此外,由于不同能源系统具有不同惯性时间常数,例如电力系统相比热网系统和气网系统,其惯性时间常数小很多,因此,能源互联网运行具有明显的多时间尺度特性。文献[24]在计及天然气慢动态特性的基础上,提出了一种基于模型预测控制的多时间尺度优化调度策略,以日前优化调度的结果作为参考值,利用模型预测控制进行日内多时段滚动优化,使得机组出力与气源产气控制过程更为平滑。文献[25]构建了可再生能源与热电联供混合微网的多时间尺度模型,基于各典型分布式能源的功率响应特性分析,得到具有有效性及可行性的多时间尺度的系统优化运行策略。

能源互联网具有较明显的非线性特征,如电力系统潮流约束非线性、气管道气流传输约束非线性等,因此优化模型通常为凸非线性模型,求解难度较大。针对这些难点,不同的文献根据各自模型的特点,采取了相应的模型简化方法和求解算法,主要有:1)利用智能算法求解,如粒子群算法^[26]、遗传算法^[27-28]等;2)对部分非线性约束条件进行线性化处理,以建立混合整数线性规划模型^[29];3)对非凸约束进行凸松弛,以建立混合整数二阶锥规划模型^[30-31]。

目前,能源互联网运行研究已取得了许多成果,但也还面临着一些关键问题与挑战。

1) 复杂不确定性因素建模。能源互联网具有多重和复杂的不确定性。多重性体现在:不确定源在电、热、气等的生产、传输、转化、甚至消费等各个环节都存在。复杂性则体现在:各种不确定性之间可能存在复杂相关性。

2) 考虑多时间尺度特性的建模。电-气-热各个系统暂态过程持续时间不同,热、天然气具有较大惯性,易于存储,气、热储能设备可以增加系统在时间尺度和空间维度上的可控性,如何利用热、气系统的惯性来平抑可再生能源的波动性的影响、实现清洁能源的消纳仍是一个亟待解决的问题。

3) 信息物理耦合交互影响。现有能源互联网研究主要立足于不同能源系统的物理互联,信息互联及信息与物理系统间的交互影响尚待探索。

2.2 规划层面

UEI的系统规划涉及负荷预测、选址定容、多网融合等问题。电、气、热等多种能源的负荷预测是规划建模的基础条件之一,UEI规划建模可以概括为综合考虑安全、经济、技术等因素,通过增加电源、气井、热电联产等装置或者新建线路、管道以满足用户的多元化用能需求。文献[32-33]提出了一种基于需求响应的负荷预测新方法,并探讨了激励策略对于不同负荷类型的影响。然而激励策略相对单一,在多能耦合的背景下影响用户用能需求的手段复杂且多样,除考虑需求响应外,还需考虑不同激励策略之间的关联特性。文献[34-37]采用神经网络、贝叶斯网络等大数据、数据挖掘新兴方法提升负荷预测的精度。

文献[38-41]分别研究了分布式电源、储能系统、变压器变电站选址定容问题,并分析了不确定性因素如分布式电源出力对规划方案的影响。文献[42-43]研究了天然气网络与城市电网协同规划问题,将两者作为一个整体,有机地结合两者数学模型和运行约束,实现了电-气耦合下的城市能源系统扩展规划。文献[44]针对区域内能源供给网络的系统规划问题开展了研究,建立了以投资、运行、经济、环境综合成本为目标函数,考虑电网、热网多元约束和电、热能源互补的区域能源供给网络规划模型。更进一步地,文献[45]提出了一种计及分布式电源不确定性的电-气-热综合能源协同规划模型,在实现清洁能源消纳的同时保证了供能的可靠性。近年来,电动汽车保有量将呈现规模化增长趋势^[46],其时空分布特性给城市能源系统的规划与运行带来了挑战,因此,城市能源互联网的规划中还

需考虑电动汽车因素。文献[47]提出了考虑充电站布局优化的配电网规划模型,在含配网安全约束条件下,通过合理分配充电需求,来降低配网投资和运行成本。文献[48]提出了一种电动汽车充电站和分布式储能与配电网多阶段联合规划模型,在模型中计及了总投资成本、运行成本和失负荷成本,通过协同规划,可以在满足传统负荷和电动汽车负荷需求的同时,降低配电网系统扩展规划的成本,延缓配电网的投资。

能源互联网的规划模型为非凸非线性模型,含大量的连续、离散变量,求解难度较大。针对这些难点,主要采用的模型简化方法和求解算法有:1)利用智能算法求解,如粒子群算法^[49]、遗传算法^[50]等;2)对部分非线性约束条件进行线性化处理,以建立混合整数线性规划模型^[51-52];3)对规划模型进行连续变量、整数变量解耦,将大规模问题分解,分模块交替迭代求解^[53]。

运行是规划的基础,因此,城市能源互联网规划也面临着运行中的复杂不确定性因素建模、多时间尺度建模等问题,但除了这些问题外,其还面临着以下一些挑战。

1) 负荷预测。未来除了考虑常规电、气、热负荷外,还需要考虑分布式电源容量、电动汽车保有量、增长速度以及用户需求弹性等因素,这极大地增加了多元化负荷预测的难度。

2) 协同规划。在城市互联网中除了考虑电-气-热等多网络耦合下的协同规划问题外,还需要计及分布式电源、储能装置、充电站等的协同规划问题。尤其是在未来电动汽车大规模接入的情况下,如何考虑“车-路-网”耦合下的充电站与能源网络的协同规划,并能够在模型中合理地计及人的主观性、交通流分布特性等因素的影响,是一个难点问题。

3) 可靠性评估。UEI是一个电、气、热、交通等多个能源网络与信息网络融合的系统,其涉及多个子系统,如何评估各个环节中各类设备的可靠性,并建立相应的约束条件或可靠性检验子模块是未来规划可靠性评估的一个难点问题。

2.3 运营模式

国内外专家学者除了对城市能源互联网进行运行与规划层面的技术研究外,还对未来的商业模式和市场机制进行了探索。文献[54]从用户服务、信息增值、业务革新、体制改革4个方面归纳分析了未来可能存在的商业模式,并提出了能量耦合、价格耦合、衍生交易“三位一体”的能源互联网交易体系。文献[55]基于信息经济学原理提出了能源

互联网交易的微平衡理论,并在此基础上分析了未来能源交易相较于传统集中交易模式的七大发展趋势,并列举了包括能源期货、能源 WiFi 等十六个未来可能的商业模式并加以讨论。文献[56]从物理层、信息层和服务层3个方面分析了城市能源互联网潜在的商业模式,并探讨了电动汽车、储能等灵活性资源对城市能源互联网潜在商业模式的影响。文献[57]在信息与物理系统融合、“源-网-荷”深度互动的基础上,提出了未来能源互联网提供业务服务的实现架构。文献[58-59]分别探讨了电动汽车V2G参与备用服务、风电消纳的商业交易模式,通过电动汽车V2G与电网的合作互动,降低了备用成本和弃风功率。

城市能源互联网的运营模式研究尚处于初步阶段,虽然国内外学者针对UEI的商业模式和市场机制进行了一些积极的探索,但仍然存在着许多尚未解决的难题,可以简单总结为以下几点:

1) 市场体系。城市能源互联的发展离不开市场的引导作用。未来需要在各种能源市场中建立现货交易、期货交易、辅助服务、碳交易等多种市场,并且要增加市场透明度,真实反映供求双方对供求关系和价格走势的预期,提高资源配置水平。此外,还需进一步深化能源行业体制改革,打破电能行业与其他能源行业壁垒,形成以电能为核心,多方能源利益主体与用户共同参与竞争的能源市场。

2) 风险评估与预防。在开放性竞争市场环境下,消费侧能源需求将存在着极大的不确定性,同时其会与生产侧能源供应不确定性、传输环节、转化环节的设备不确定性相互耦合,如何评估复杂不确定性因素带来的价格风险、运行风险和经营风险是未来需要深入探讨的重点问题。此外,如何建立有效的预防机制来规避这些风险带来的影响也是一个难点问题。

3 城市能源互联网的总体架构设计

能源传输按照决策、调度和传输三个不同的逻辑层级,分为价格层、信息层和传输层。在价格层,根据能源市场化交易行为,决定了能源按价格规律的供需流向。在信息层,通过传感器、信息采集装置和通信网络等,实现对能源系统运行状态、设备运行工况、市场交易等的全局监控,并为优化控制提供决策支撑。在传输层,能源网络具有开放接入、灵活可控等特征,通过高效的能源转换设备实现不同能源子系统的耦合互联,各种形式的能源通过协同互补实现能源最优利用。城市能源互联网技术架构如图1。

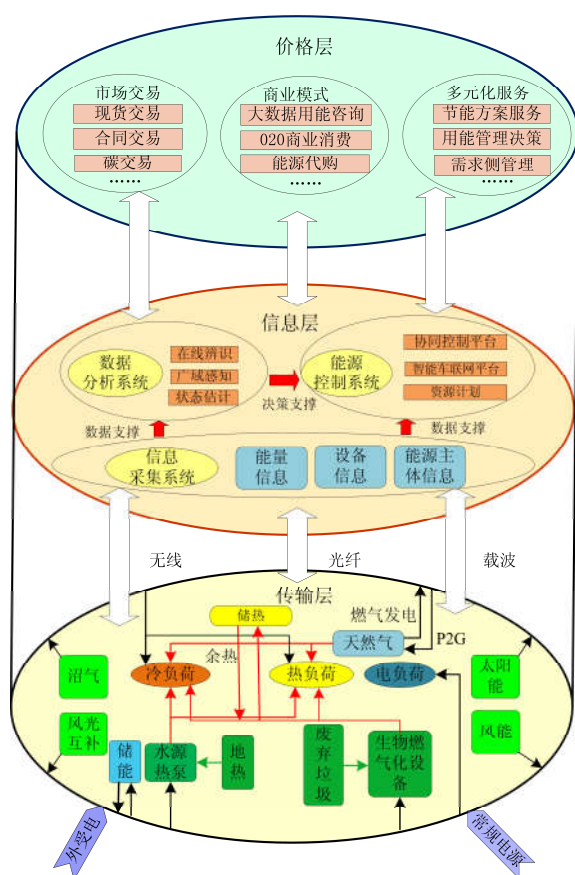


图1 城市能源互联网技术架构

Fig. 1 Technology architecture of urban energy internet

3.1 城市能源互联网的传输层架构

传输层是城市能源输送的物理途径,在传输层构建结构坚强、运行灵活、共享互动的能源供给网络,是城市能源互联网的物理基础。城市能源互联网在形态上是以电力系统为核心,并结合天然气、石油、交通等系统构成的复杂系统。城市电网作为城市能源互联网的核心枢纽,相对比传统电网要更加开放和灵活,电网在电源侧要实现对多种能源的开放接入,在负荷侧电网要满足用户的多种用能需求及其互补转换。

城市能源互联网的发展必须依赖于高效率的能源转换设备,通过不同能源形式间的高效转化,真正发挥多能互补的优势。电、气、热等不同能源子系统间可以通过一些能源转换设备实现耦合互联,如电网和电气化交通网通过充电桩连接、热电联产机组可以联通热网和电网、电网和天然气网通过燃气机组和电转气技术(Power to Gas, P2G)实现互联等;各个能源子系统间物理层面的互联互通,是城市能源互联网实现“多源-多网-多荷-多储”协调互动的基础,而要真正提升能源综合利用效率、实现

能源转型,高效率的能源转换设备将起到核心支撑作用。

3.2 城市能源互联网的信息层架构

传统电网在向城市能源互联网升级过程中,其开放共享、状态感知和灵活控制的特性均需要依靠数字化实现。因此在传输层之上,需要在现有电网自动化的基础上进行升级,构建城市能源互联网信息层架构。相对于传统电网自动化,新的架构需要更加实时快速的信息传递、更加开放的通信协议、更加准确和智能的逻辑控制程序以及更加安全的信息防护系统。需要升级现有电网通信网络、升级传感终端的功能并增加传感器的数量,构建一张可以实时反映当前电网运行状态的数字化电网。

依靠城市互联网内的采集和传输装置,采集基于同步时标、包括能量信息(电压、电流、气压、温度等)、设备信息、各能源主体信息(储能、充电站、分布式电源、电网等)等在内的信息,具备全状态观测能源系统运行状态、设备运行工况等的物理量信息,最大程度上降低系统状态和参数的不可观性和随机性,为能源控制系统内多能源协同控制、智能车联网和资源计划等平台提供决策支撑,从而引导传输层的能量流动和价格层的资金流动,实现城市能源互联网高效、安全和经济的运行目标。

3.3 城市能源互联网的价格层架构

城市能源互联网的价格层面包含市场交易(现货交易、合同交易、碳交易等)、商业模式(用能咨询、O2O商业消费、能源代购等)、多元化服务(节能方案、用能决策管理、需求侧管理等)等多个方面的内容,其本质是在开放竞争的市场环境下,通过价格、市场机制来实现资源的优化配置与管理。

城市能源互联网的设计目标是要实现能源利用效率的最大化,调节资源分布不均衡,促使能源转换由传统的单一模式向多元化方向发展,实现多元化负荷需求在时间维度和空间维度上的合理分布。要实现这一目标,除了在传输层实现高效的能源转换与协调运行,在信息层实现网络、设备、能源主体等的状态实时监控,还需要在价格层建立合适的市场体系与价格机制,引导能源主体运行商、代理商与用户等积极有序地参与能源的生产、传输、转化、消费等各个环节。

当前正是国家大力推动电力市场改革,促进公平公正的电力市场交易发展的有利时机,在电力市场构建实时的价格层架构,通过价格机制引导用电负荷实时地在不同时空均衡分布,例如根据电网设备的运行状况,通过电动汽车充电价格的差异引导

电动汽车用户到负载率低的电网设备下的充电桩充电, 提高网络使用效率。

此外, 能源互联网实现能源清洁替代的目标, 也需要构筑一个能使供需双方直接互动的价格层架构。例如眼下对于光伏、风电等新能源的上网补贴政策以及光伏、风电等新能源出力间歇的特性, 使得新能源供应商、电网和用户均没有针对清洁能源利用进行创新的迫切动力。而在实现新能源、电网和负荷等实时监控并数字化以及储能设备大规模利用的基础上, 通过电力交易平台, 可以使得供需双方根据新能源出力和报价情况实时交易, 提高新能源的消纳利用率。

4 实现三层架构的创新方向

城市能源互联网是功能多元、智能先进的社会公共平台, 其提供面向用户不同需求的新型业务, 如电动汽车充放电、家庭能效管理、工业系统节能、能源资产管理、分布式电源并网等。基于价格层、信息层和物理层的技术架构反映了城市能源互联网资金流、信息流和能量流之间的耦合传递关系, 其是城市能源转型的关键支撑点。而推动城市能源互联网技术架构的实现, 必须在规划、控制、综合能源服务等方面作出突破, 必须研究能源互联网统筹规划技术、综合能源协同控制技术、电动汽车有序充放电技术、高性能能源通信网技术、智能需求响应技术以及更高等级的信息安全防护技术等前沿技术, 并在电力交易、综合能源发展政策、规划政策等方面进行改革, 全方位推动能源互联网从传输层、信息层到价格层架构的发展。如图 2 所示。

4.1 面向能源互联网的协同规划方法

城市能源互联网中含有电、气、热等多种负荷, 并且多种负荷需求间存在耦合、转化关系, 因此, 综合能源负荷预测方法相比于传统的电力负荷或是其他单一的能源负荷预测方法有了很大区别。此外, 在考虑电、气、热负荷预测时, 还需要考虑分布式电源容量、电动汽车保有量、增长速度以及用户需求弹性等因素的影响, 这极大地增加了负荷预测的难度, 需要革新负荷预测方法和预测模型以适应城市能源互联网的规划要求。

在城市能源互联网的传输层架构中, 分布式清洁能源、电动汽车充电桩、储能(包含储热、蓄冷和储能电池)等元件已经和传输网络融为一体, 需要进行一体化规划。因此, 需要开展城市能源互联网统筹规划方法研究, 建立统筹考虑源-网-荷-储的协同规划模型。规划的对象不仅需要包含传输网络, 还需要因地制宜, 对清洁电源、储能、电动汽车充电

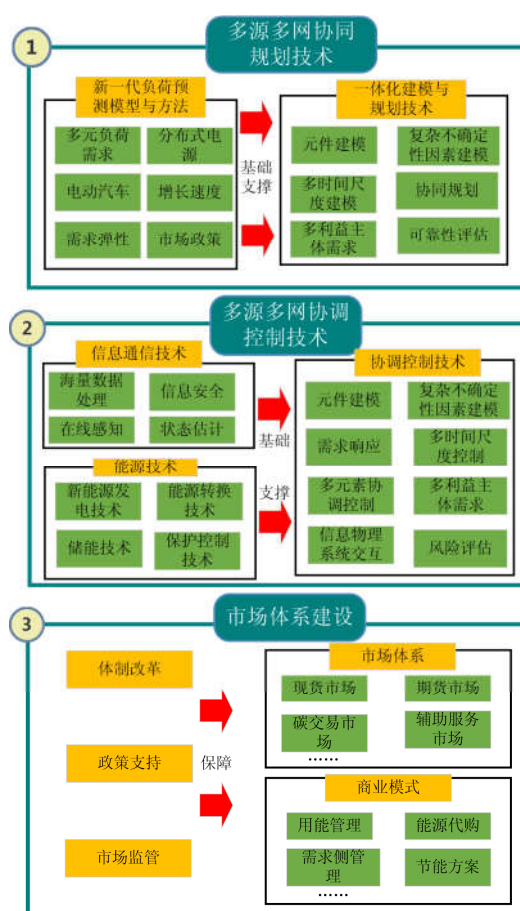


图 2 城市能源互联网未来发展方向

Fig. 2 Future development direction of urban energy internet

桩等进行同步统筹规划, 实现对区域分布式电源、电网、储能设备和需求侧设备的规划控制和有序接入。

此外, 城市能源互联网具有多重不确定性、多时间尺度特性以及多利益主体等特点。必须研究能源生产、传输、转化和消费过程中的多重耦合复杂不确定性因素建模方法; 必须研究计及不同能源子系统的时间尺度差异特性的多时间常数系统建模方法; 必须研究考虑不同能源主体利益需求如电力公司、天然气公司、分布式电源运营商等的源-网-荷-储协同规划方法。另外, 由于城市能源互联网元件众多, 还必须研究计及不同元件状态的可靠性评估方法。

4.2 面向能源互联网的协同控制技术

能源互联网的控制对象从传统的传输侧延伸到了能源生产侧和消费侧, 控制对象的资产归属方也呈多元化趋势, 因此, 其中的安全生产规程、信息安全手段都需要进行创新和升级。此外, 能源互联网物理信息系统需要传输的数据量相比传统电力

自动化数据的数量有了极大提高,因此需要对通信网络进行全面升级。

要实现综合能源系统的协同控制,需要建立面向能源供应、能源传输以及能源消费侧的信息系统,构建从能源生产、传输、转化和消费的数字化监控系统,即城市能源互联网协同监控平台,实现对电网、气网、热网、分布式电源、港口岸电、电动汽车、储电、储热和蓄冷等能源网络、设备运行工况的监控,实现城市能源互联网信息层架构的构建。在此基础上,需要研究信息系统和物理系统耦合后的交互影响以及风险传播机制,分析信息物理系统耦合后的生产、传输、转化以及消费等环节的薄弱点,提升城市能源互联网的运行可靠性。

能源互联网相较于传统能源系统具有利用效率更高、能源生产消费更清洁以及能源生产传输成本更低等诸多优势,而这些优势必须以能源生产、转化、传输、储存、接入等各方面关键技术的突破作为支撑,因此未来必须在源-网-储-荷等关键技术上作出创新,尤其需对电-热、电-冷、电-交通等能源形式间高效转换技术开展研究。

此外,城市能源互联网具有元件众多、不确定性因素复杂等特点,必须研究能源生产、传输、转化和消费过程中的复杂耦合不确定性因素建模方法,在此基础上,研究计及电、气、热网络、储能、分布式电源、电动汽车等多元素协同优化控制方法。此外,电-气-热各个系统暂态过程持续时间不同,热、天然气具有较大惯性,易于存储,气、热储能设备可以增加系统在时间尺度和空间维度上的可控性,必须研究通过多时间尺度协同控制提升清洁能源消纳的策略与方法。

4.3 面向能源互联网的市场体系建设

城市能源互联网必须建设开放、自由、竞争的市场体系,充分调动市场中各商业主体的积极性,实现最大化的价值创造。目前,电力、石油等能源行业已拉开体制改革的序幕,未来还需进一步深化能源行业体制改革,打破电能行业与其他能源行业壁垒,形成以电能为核心,多方能源利益主体与用户共同参与竞争的能源市场。

未来需要在各种能源市场中建立现货交易、期货交易、辅助服务、碳交易等多种市场,并且要增加市场透明度,真实反映供求双方对供求关系和价格走势的预期,提高资源配置水平。同时还需探索和发展未来可能的商业模式,如用能管理、能源代购等,切实推进城市能源互联网市场繁荣发展。

此外,城市能源互联网市场化体系建设与运营离不开政策的支持与相关部门的监管,未来需加大

中央和地方政府预算内资金投入力度,扶持一批具有核心竞争力与机制创新的企业。推进数据开放共享、加强能源市场监管。

5 城市能源互联网在厦门的实践探索

5.1 厦门城市能源总体概况

厦门是一座旅游型城市,在 2017 年被习近平总书记誉为“高素质的创新之城、高颜值的生态之城”,其城市禀赋对能源的清洁性、集约化、安全性以及经济性有着很高的要求,对建设城市能源互联网有迫切的需求。

厦门目前能源供应结构中化石能源(煤炭、石油和天然气)占比约 65%,环保压力大;电力在终端消费市场占比较低,仅占 35%。福建省核电、水电风电和光伏等清洁能源发电装机占比为 45%,拥有 1 000 kV 榕城(福州)特高压变电站,境内特高压线路 342 km,电力富裕且清洁能源占比高;厦门天然气全部依赖远距离输运,天然气供应相对紧张。除了电能具有完善可靠的城市整体网络外,工业用热(冷)、交通用油和燃气等的供应系统大部分是局部网络或独立分散分布,不具备互联共享能力,无法实现综合调度和协调优化。此外,环保压力带来的燃煤热电改造、电动汽车、港口岸电推广等,也为综合能源发展带来迫切需求。

5.2 厦门城市能源互联网的实践经历

厦门城市能源互联网建设的目标是构建以电为转换中心,冷、热、电、交通多种用能需求综合协调、互联互通的用能网络。不断推进再电气化,构筑清洁低碳、安全高效的城市能源体系。

厦门城市能源互联网建设的有关思路得到了政府各级领导的充分肯定和大力支持,并与厦门市发改委等主要部门成立联合调研小组,以“创新、绿色、协调、开放、共享”为目标,在城市能源互联网统一规划、统一发展和统一控制方面开展政策研究。2018 年 10 月厦门发布了《厦门城市能源互联网建设白皮书》,政、企各界对能源互联网的建设思路和发展方向形成广泛共识。

在发展上,厦门电网多年来在主动配电网、配电网物理信息系统等前沿领域的技术创新为实现综合能源的协同控制打好了基础,初步完成了城市能源互联网传输层和信息层技术框架。

1) 鼓浪屿城市能源互联网规划

根据新一代城市电网发展需求,研究了城市电网内多类资源协同规划方法,提出了一种考虑分布式电源、储能和电动汽车等多类柔性资源响应特性以及与电网交互特性的协同规划方法,并选取厦门

鼓浪屿作为新一代电网规划试点,实现了对鼓浪屿区域内分布式电源、储能设备、电动汽车充电站和电网的规划控制和有序接入。2018年10月,鼓浪屿能源互联网规划编制完成并通过评审,所提多能协同规划方法已在厦门大嶝岛进行进一步试点完善。未来将以厦门大嶝岛的多能协同规划理论和实践经验为指导依据,进一步推进厦门鼓浪屿综合能源系统的发展。

2) 厦门主动配电网系统试点

落地了国家863课题“主动配电网关键技术研究及应用”的技术成果。该课题研究了主动配电网规划及规划运行互动决策、供电质量控制、多能源协同交互控制、基于多源信息融合的主动配电网态势感知等关键技术,研制了综合配电终端单元和快速切换装置,开发了运行控制系统、规划决策系统和信息平台,并形成了主动配电网规划运行互动决策系列规范和技术体系。该课题选取厦门岛内的会展区进行了主动配电网试点,通过部署主动配监测单元(IDU)、快切开关、多源负荷调节系统、多能协同控制和监控系统,实现了对分布式电源发电情况的实时监测以及电网潮流的灵活控制。该课题所提多能源协同交互控制和基于多源信息融合的主动配电网态势感知等关键技术为厦门进一步推进城市能源互联网建设提供了基础支撑。

3) 配电网物理信息系统试点

落地了国家863课题“配电网物理信息系统关键技术研究及应用”的技术成果。该课题研究了多源异构配电网CPS综合建模、协同控制、基于IEC61850标准的开放式通信和网络安全等关键技术,并形成了相关技术的行业或企业标准。所研制的多源异构配电网CPS综合控制系统,实现了示范应用控制对象不少于2000个,终端与主站之间交换时间小于1s,该课题在厦门的同安区、翔安区进行了配电网物理信息系统试点。在示范区内,进行了329个站点一二次设备改造,搭建通信网络,构建了配电网CPS支撑多源异构配电网运行的电力信息与控制综合系统,实现了监控终端在分布式电源侧、电网侧和储能侧、负荷侧的即插即用及有效的信息安全防护,所提的电网物理信息系统终端部署与控制策略,为下一步全面建设城市能源互联网物理信息系统提供了理论与实践基础。

厦门电网在前期建设中,已经初步实践了城市能源互联网内分布式电源、电动汽车、储能设备等多类柔性资源与电网协同规划方法。试点建设了主动配电网示范区,初步构建了能够根据供需情况灵活可控的主动配电网,初步构建传输层技术架构。

通过试点建设配电网物理信息系统,建成了新型的配电网物理信息系统主站,实现了示范区电网传输层和信息层的交互实时反映,实现了电源侧、电网侧、负荷侧和储能侧的可观、可控、就地自愈以及就地平衡,初步构建城市能源互联网信息层架构。在价格层,近年来厦门电动汽车发展迅速,通过对不同充电站充电价格和充电负荷的监控,可以发现价格对负荷转移具有十分重要的指导意义。但由于政策因素,价格层的构建还未能开展实践。

5.3 厦门城市能源互联网的发展展望

下一步要继续在统筹规划、源网荷协同控制、电力物联网、相变储热技术研发等方面开展技术攻关。通过研究城市能源互联网统筹规划方法,建立新一代负荷预测模型,实现对区域电网、气网、热网、分布式电源、储能设备、充电站等的协同规划。通过开展城市能源互联网协同监控平台研究,实现对分布式电源、港口岸电、电动车、储电、储热和蓄冷装置的全景监视和控制调配。开展电动汽车智能充电控制系统等综合能源协同控制技术的研发,调控储热、蓄冰和储能电站,平抑峰谷,提高电网设备的利用效率;通过开展电蓄热蒸汽锅炉的研发和示范应用,为电热转换存储控制和电锅炉全面替代燃煤锅炉提供示范样本;建设全业务覆盖的电力物联网和信息安全防护体系,承载和保障厦门城市能源物联网高效运行。

6 结论

城市能源互联网是一场能源信息革命,其将打破传统的能源供应模式和消费理念,促使能源产业结构调整 and 转型升级。本文通过对比现有文献的观点,给出了城市能源互联网的定义,并阐述了城市能源互联网的核心思想和主要特征。从运行、规划和运营的角度归纳分析了城市能源互联网的发展现状与面临的挑战,旨在为未来的工程建设提供一定的参考。针对城市能源互联网互联互通的技术要求提出了价格层-信息层-传输层三位一体的技术架构体系,并分析了城市能源互联网中关键技术的创新发展方向。最后介绍了国网厦门供电公司在厦门市能源网络上的技术实践与总结感悟。

参考文献

- [1] 颜彭莉. 首次给40个城市能源发展“画像”[J]. 环境经济, 2018(增刊3): 74-79.
YAN Pengli. "Portrait" of energy development of 40 cities for the first time[J]. Environment Economy, 2018(S3): 74-79.

- [2] 孙可, 吴臻, 尚楠, 等. 以省为实体的区域能源互联网内涵框架及发展方向分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 1-9.
SUN Ke, WU Zhen, SHANG Nan, et al. Provincial regional energy internet framework and development tendency analysis[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 1-9.
- [3] 丁涛, 牟晨璐, 别朝红, 等. 能源互联网及其优化运行研究现状综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(15): 4318-4328, 4632.
DING Tao, MU Chenlu, BIE Zhaohong, et al. Review of energy internet and its operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(15): 4318-4328, 4632.
- [4] 韦晓广, 高仕斌, 臧天磊, 等. 社会能源互联网: 概念、架构和展望[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(17): 4969-4986, 5295.
WEI Xiaoguang, GAO Shibin, ZANG Tianlei, et al. Social energy internet: concept, architecture and outlook[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(17): 4969-4986, 5295.
- [5] RIFKIN J. The third industrial revolution: how lateral power is transforming energy, the economy, and the world[M]. New York: Palgrave MacMillan, 2011: 24-71.
- [6] 董晓峰, 苏义荣, 吴健, 等. 支撑城市能源互联网的主动配电网方案设计及工程示范[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(增刊 1): 75-85.
DONG Xiaofeng, SU Yirong, WU Jian, et al. Scheme design and engineering demonstration of active distribution network supporting city energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(S1): 75-85.
- [7] 刘方泽, 牟龙华, 何楚璇. 微能源网信息物理系统模型及其协调控制[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(17): 16-23.
LIU Fangze, MU Longhua, HE Chuxuan. Modeling and control of cyber physical system for micro-energy network[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(17): 16-23.
- [8] 宁晓静, 张毅, 林湘宁, 等. 基于物理-信息-价值的能源区块链分析[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2312-2323.
NING Xiaojing, ZHANG Yi, LIN Xiangning, et al. Energy block chain system based on integrated physical-cyber-value perspectives[J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2312-2323.
- [9] 龚钢军, 高爽, 陆俊, 等. 地市级区域能源互联网安全可靠防护体系研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(10): 2861-2873, 3137.
GONG Gangjun, GAO Shuang, LU Jun, et al. Study on secure trusted protection architecture for prefecture-level regional energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(10): 2861-2873, 3137.
- [10] 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.
- [11] 洪居华, 刘俊勇, 向月, 等. 城市能源互联网初步认识与研究展望[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 15-25.
HONG Juhua, LIU Junyong, XIANG Yue, et al. Understanding and prospects of urban energy internet[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 15-25.
- [12] GEIDL M, KOEPEL G, FAVRE-PERROD P, et al. Energy hubs for the future[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2007, 5(1): 24-30.
- [13] BOZCHALUI M C, HASHMI S A, HASSEN H, et al. Optimal operation of residential energy hubs in smart grids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4): 1755-1766.
- [14] BAHRAMI S, SAFE F. A financial approach to evaluate an optimized combined cooling, heat and power system[J]. Energy and Power Engineering, 2013, 5(5): 352-362.
- [15] PROIETTO R, ARNONE D, BERTONCINI M, et al. Mixed heuristic-nonlinear optimization of energy management for hydrogen storage-based multi carrier hubs[C] // Proceedings of 2014 IEEE International Energy Conference, May 13-16, 2014, Cavtat, Croatia: IEEE, 2014: 1019-1026.
- [16] PARISIO A, VECCHIO C D, VELOTTO G. Robust optimization of operations in energy hub[C] // Proceedings of 2011 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, December 12-15, 2011, Orlando, FL, USA: 4943-4948.
- [17] ALABDULWAHAB A, ABUSORRAH A, ZHANG Xiaping, et al. Coordination of interdependent natural gas and electricity infrastructures for firming the variability of wind energy in stochastic day-ahead scheduling[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(2): 606-615.
- [18] 朱兰, 王吉, 唐陇军, 等. 计及电转气精细化模型的综合能源系统鲁棒随机优化调度[J]. 电网技术, 2019, 43(1): 116-126.
ZHU Lan, WANG Ji, TANG Longjun, et al. Robust stochastic optimal dispatching of integrated energy systems considering power to gas refined model[J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 116-126.

- [19] PARISIO A, DEL VECCHIO C, VACCARO A. A robust optimization approach to energy hub management[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2012, 42(1): 98-104.
- [20] 张彦, 张涛, 孟繁霖, 等. 基于模型预测控制的能源互联网系统分布式优化调度研究[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(23): 6829-6845.
ZHANG Yan, ZHANG Tao, MENG Fanlin, et al. Model predictive control based distributed optimization and scheduling approach for the energy internet[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(23): 6829-6845.
- [21] 潘振宁, 王克英, 瞿凯平, 等. 考虑大量 EV 接入的电—气—热多能耦合系统协同优化调度[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(4): 104-112.
PAN Zhenning, WANG Keying, QU Kaiping, et al. Coordinated optimal dispatch of electricity-gas-heat multi-energy system considering high penetration of electric vehicles[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(4): 104-112.
- [22] 李媛, 冯昌森, 文福拴, 等. 含电动汽车和电转气的园区能源互联网能源定价与管理[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(16): 1-10, 192-196.
LI Yuan, FENG Changsen, WEN Fushuan, et al. Energy pricing and management for park-level energy internets with electric vehicles and power-to-gas devices[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(16): 1-10, 192-196.
- [23] AGHAEI J, NEZHAD A E, RABIEE A, et al. Contribution of plug-in hybrid electric vehicles in power system uncertainty management[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2016, 59: 450-458.
- [24] 梅建春, 卫志农, 张勇, 等. 电—气互联综合能源系统多时间尺度动态优化调度[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(13): 36-42.
MEI Jianchun, WEI Zhinong, ZHANG Yong, et al. Dynamic optimal dispatch with multiple time scale in integrated power and gas energy systems[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(13): 36-42.
- [25] 裴玮, 邓卫, 沈子奇, 等. 可再生能源与热电联供混合微网能量协调优化[J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(16): 9-15.
PEI Wei, DENG Wei, SHEN Ziqi, et al. Energy coordination and optimization of hybrid microgrid based on renewable energy and CHP supply[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(16): 9-15.
- [26] 徐宪东. 电/气/热微型能源系统的建模、仿真与能量管理研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
XU Xiandong. Research on modeling, simulation and energy management of electric/gas/heat micro energy systems[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [27] LI Chendan, DE BOSIO F, CHEN Fang, et al. Economic dispatch for operating cost minimization under real-time pricing in droop-controlled DC microgrid[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2017, 5(1): 587-595.
- [28] VELLAITHURAI C, SRIVASTAVA A, ZONOUZ S, et al. Cpinde: cyber-physical vulnerability assessment for power-grid infrastructures[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2015, 6(2): 566-575.
- [29] 吴雄, 王秀丽, 别朝红, 等. 含热电联供系统的微网经济运行[J]. *电力自动化设备*, 2011, 33(8): 1-6.
WU Xiong, WANG Xiuli, BIE Zhaohong, et al. Economic operation of microgrid with combined heat and power system[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2011, 33(8): 1-6.
- [30] BORRAZ-SÁNCHEZ C, BENT R, BACKHAUS S, et al. Convex relaxations for gas expansion planning[J]. *Informa Journal on Computing*, 2016, 28(4): 645-656.
- [31] HE Yubin, YAN Mingyu, SHAHIDEHPOUR M, et al. Decentralized optimization of multi-area electricity natural gas flows based on cone reformulation[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(4): 4531-4542.
- [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), September 9-12, 2012, Florence, Italy: 641-646.
- [33] 刘继东, 韩学山, 韩伟吉, 等. 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, et al. Model and algorithm of customers responsive behavior under time-of-use price[J]. *Power System Technology*, 2013, 37(10): 2973-2978.
- [34] 王德文, 孙志伟. 电力用户侧大数据分析并行负荷预测[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(3): 527-537.
WANG Dewen, SUN Zhiwei. Big data analysis and parallel load forecasting of electric power user side[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(3): 527-537.
- [35] SOLDI B. Forecasting natural gas consumption[J]. *Applied Energy*, 2012, 92: 26-37.
- [36] SAJJADI S, SHAMSHIRBAND S, ALIZAMIR M, et al. Extreme learning machine for prediction of heat load in district heating systems[J]. *Energy and Buildings*, 2016, 122: 222-227.
- [37] 曹军威, 袁仲达, 明阳阳, 等. 能源互联网大数据分析

- 技术综述[J]. 南方电网技术, 2015, 9(11): 1-12.
- CAO Junwei, YUAN Zhongda, MING Yangyang, et al. Survey of big data analysis technology for energy internet[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(11): 1-12.
- [38] 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.
- [39] 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: 218-230.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] 白学祥, 曾鸣, 李源非, 等. 区域能源供给网络热电协同规划模型与算法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 65-72.
- BAI Xuexiang, ZENG Ming, LI Yuanfei, et al. The model and algorithm of thermoelectric collaborative planning of regional energy supply network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 65-72.
- [45] 李哲, 王成福, 梁军, 等. 计及风电不确定性的电-气-热综合能源系统扩展规划方法[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3477-3487.
- LI Zhe, WANG Chengfu, LIANG Jun, et al. Expansion planning method of integrated energy system considering uncertainty of wind power[J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3477-3487.
- [46] 闫孟迪, 夏卫国, 杨晓萍, 等. 电动汽车充电设施行业政策综述[J]. 新能源汽车供能技术, 2017, 1(1): 32-37.
- YAN Mengdi, XIA Weiguo, YANG Xiaoping, et al. Review of the policy of electric vehicle charging infrastructure[J]. Energy Supply Techniques of New Energy Vehicles, 2017, 1(1): 32-37.
- [47] 杜爱虎, 胡泽春, 宋永华, 等. 考虑电动汽车充电站布局优化的配电网规划[J]. 电网技术, 2011, 35(11): 35-42.
- DU Aihu, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Distribution network planning considering layout optimization of electric vehicle charging stations[J]. Power System Technology, 2011, 35(11): 35-42.
- [48] 贾龙, 胡泽春, 宋永华, 等. 储能和电动汽车充电站与配电网的联合规划研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 73-84.
- JIA Long, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Joint planning of distribution networks with distributed energy storage systems and electric vehicle charging stations[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 73-84.
- [49] 赵峰, 张承慧, 孙波, 等. 冷热电联供系统的三级协同整体优化设计方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(15): 3785-3793.
- ZHAO Feng, ZHANG Chenghui, SUN Bo, et al. Three-stage collaborative global optimization design method of combined cooling heating and power[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(15): 3785-3793.
- [50] GUO Li, LIU Wenjian, CAI Jiejian, et al. A two-stage optimal planning and design method for combined cooling, heat and power microgrid system[J]. Energy Conversion and Management, 2013, 74: 433-445.
- [51] 胡源, 别朝红, 李更丰, 等. 天然气网络和电源、电网联合规划的方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 45-54.
- HU Yuan, BIE Zhaohong, LI Gengfeng, et al. Integrated planning of natural gas network and composite power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 45-54.
- [52] KHODAEI A, SHAHIDEHPOUR M, WU L, et al. Coordination of short-term operation constraints in multi-area expansion planning[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 2242-2250.
- [53] ZHANG Xiaping, SHAHIDEHPOUR M, ALABDULWAHAB A S, et al. Security-constrained co-optimization planning of electricity and natural gas transportation infrastructures[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(6): 2984-2993.

- [54] 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.
- [55] 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.
- [56] 谢光龙, 贾梦雨, 韩新阳, 等. 城市能源互联网的商业模式探讨[J]. 电力建设, 2018, 39(2): 10-17.
XIE Guanglong, JIA Mengyu, HAN Xinyang, et al. Preliminary exploration on business model of urban energy internet[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(2): 10-17.
- [57] 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.
- [58] 张谦, 史乐峰, 任玉珑, 等. 计及 V2G 备用服务的交易模式[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(31): 59-67, 219.
ZHANG Qian, SHI Lefeng, REN Yulong, et al. The reserve trading model considering vehicle-to-grid reserve[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(31): 59-67, 219.
- [59] 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.

收稿日期: 2018-12-25; 修回日期: 2019-03-15

作者简介:

周敬东(1970—), 男, 高级工程师, 长期从事电网规划、建设和运行管理, 研究方向为综合能源服务、城市能源互联网发展等。E-mail: zhou_jingdong@fj.sgcc.com.cn

(编辑 葛艳娜)