

从变电站到能源综合服务站: 演化路径探讨

高正平¹, 刘昊宇², 李琥³, 刘国静³, 王洪儒², 王琦^{2*}, 汤奕²

(1. 国网江苏省电力有限公司, 江苏省 南京市 210008;

2. 东南大学电气工程学院, 江苏省 南京市 210096;

3. 国网江苏省电力有限公司经济技术研究院, 江苏省 南京市 210008)

From Substation to Integrated Energy Service Station: Discussion on the Evolutionary Path

GAO Zhengping¹, LIU Haoyu², LI Hu³, LIU Guojing³, WANG Hongru², WANG Qi^{2*}, TANG Yi²

(1. Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210008, Jiangsu Province, China;

2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu Province, China;

3. State Grid Jiangsu Economic Research Institute, Nanjing 210008, Jiangsu Province, China)

Abstract: The advancement of energy Internet construction puts forward higher requirements for multi-heterogeneous energy scheduling and multi-source information processing. The integrated energy service station to realize regional energy integrated monitoring, optimal control, and unified service has become a new generation of energy Internet control hubs. Given the evolution path from the traditional substation to the integrated energy service station, this paper first proposes the construction path and analyzes the applicable scenarios of two types of integrated energy service stations, that is, the entity and virtual stations, from the perspective of construction planning and station site transformation. Then, based on the three typical energy scenarios of industrial areas, data centers, and commercial parks, the key role of integrated energy service stations in the construction of the energy Internet is analyzed in depth. Key technologies and feasible solutions for the construction of integrated energy service stations are also discussed. Finally, future research directions for integrated energy service stations are discussed.

Keywords: integrated energy service station; energy Internet; multistation integration; cyber-physical system

摘要: 能源互联网建设的推进对多异质能源调度和多源信

息处理提出了更高要求。能够实现区域能源一体化监控、优化控制和统一服务的能源综合服务站成为新一代能源互联网管控枢纽。针对传统变电站到能源综合服务站的演化路径,首先从建设规划和站址改造角度提出了实体站与虚拟站2种能源综合服务站的 建设路径,并分析了其适用场景;然后,基于工业区、数据中心和商业园区3种典型用能场景,深入分析了能源综合服 务站在能源互联网建设中的关键作用,并进一步讨论了能源综合服务站建设过程中所需解决的关键技术 问题及可行方案;最后,对能源综合服务站的未来研究方向进行了展望。

关键词: 能源综合服务站; 能源互联网; 多站融合; 信息物理系统

0 引言

自中国明确提出力争2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和以来,“双碳”目标一直是全社会热议的话题。随着国家能源革命战略的不断推进,建设以电网为骨干网架的能源互联网成为能源系统融合发展的重要方向^[1]。

如何推动电网向能源互联网转变是能源互联网建设中的一大难题。变电站作为传统电网的电能枢纽,承担着区域电力配电、电压等级变换、电流汇集和电压调整等重要作用。而能源综合服务站作为能源互联网的核心,既是数据的集成中心,也是能源的调控中心,除了变电功能外,还实现了信息集成共享、能源协同调配等功能。在信息物理系统(cyber-physical

基金项目: 国家电网公司科技项目(能源综合服务站为枢纽的电网信息物理系统规划评估及运行策略关键技术, 5700-202018196A-0-0-00)。

Science and Technology Foundation of SGCC (Key Technologies for Planning, Evaluation and Operation Strategy of Power Grid Cyber-physical System Based on Integrated Energy Service Station, 5700-202018196A-0-0-00).

system, CPS)的框架下,变电站将向集能源转换设备、数据中心、无线基站等功能单位于一体的能源综合服务站转变,强化了信息系统与物理系统的融合,不仅使传统变电站由电网节点向区域能源互联网枢纽节点演变,为区域能源互联网建设提供核心支撑,更是通过以能源综合服务站为枢纽的电网CPS建设,充分发挥能源综合服务站的枢纽、平台、共享作用^[2-3]。

多站融合的实现,能够增强各能量系统之间的协调潜力,是规划能源综合服务站、最终实现协调运行控制的基础。文献[4]梳理了多站融合的研究现状,提出了全直流母线综合站建设架构。文献[5]通过优化多站融合供电系统中的储能电站容量来实现供电区域自治。当前已有大量对多站融合的工程探索,例如无锡祝塘能源综合服务站和国网合肥始信路“七站融合”示范站^[6]。然而这些建设模式并未产生统一的标准,并未对其融合的潜力和业务的构造改变进行深刻探讨,仍处于摸索阶段,未上升到理论高度。

能源综合服务站的整体架构同时依赖CPS与多能系统领域的发展。信息物理的融合需要考虑融合架构设计^[7],可靠性评估及风险分析^[8],系统异构及交互特性^[9],多种通信网络融合^[10]等问题。许多研究从宏观角度构想了CPS的整体框架和基本内涵,尽管侧重点不同,但均认为CPS的主要目标是通过与信息以及信息系统的充分开发应用,使物理系统运行效果和性能得到优化^[11-12]。以能源综合服务站为枢纽的CPS目的在于实现多种能源互联互通,高效协调运行。然而现阶段,CPS仍主要以电网为研究对象,较少考虑气、热等其他物理系统的特性。

多能源系统由社会供能网络、能源交换环节和广泛分布的终端能源单元系统构成,包括电力、燃气、冷/热等多种能源环节与交通、信息等社会基础有机结合。与传统单一供能方式相比,多能系统可以实现能源高效利用^[13]、促进新能源消纳^[14]、满足多种能源梯级利用^[15]、社会供能安全可靠^[16]等目的。多能系统的研究主要着眼于能源流的运行,较少涉及数据流的共享和业务流的协同。因而,在现有研究中,这2个系统在规划、运行及控制上未能做到协同统一。

基于以上问题,本文首先介绍了能源综合服务实体站和虚拟站规划建设的特点,并提出了一个虚拟站能量流-信息流-业务流多层次协调运行架构。其次从工业园区、数据中心、商业园区这3个典型场景分析了能源综合服务站建设的优势。接着从配置融合、信息通信和业务融合三方面论述了能源站建设的关键技

术。最后展望了能源综合服务站发展建设需要探索的方向。

1 能源综合服务站架构

不同文献对能源综合服务站内涵描述如表1所示。传统能源站以多能管网为核心,通常侧重实现多类型能源的基础供应。而能源综合服务站立足于能源的综合服务,起源于“多站融合”概念,所以在包含多能管控的基础上,更加强调的是提供站址资源、通信资源、能源资源的综合服务^[17]。

能源综合服务站实现了能量流、信息流、业务流的耦合,按重新规划场景或是基于现有站址改造分为实体站与虚拟站2种。能源综合服务实体站是将各能源生产设备、转换装置、储能装置、信息控制中心都囊括在内的新建一体站,是“从无到有”的初始规划。能源综合服务虚拟站是在传统变电站的基础上,将变电站改造成一个下层控制中心,通过CPS上层指令来调度变电站周边各种分散站址资源,类似于一个半同构的信息物理融合模型。

表1 能源综合服务站内涵描述

Table 1 Connotation description of integrated energy service station

文献序号	能源综合服务站内涵描述
[18]	保证用户基础用能需求的同时,依托终端能源设备和能源管理手段,实现经济、低碳、安全等目标,提供用户增值能源服务的能源站
[19]	既能满足区域能源需求,又能提供辅助服务的能源站
[20]	设立综合能源服务商的能源站,可实现电-热-气能量转换的综合需求响应和参与多能市场交易
[21]	根据用户能源消费特征,以能源互联网为载体,通过协调优化区域内各种能源资源配置来满足终端用户当前或潜在能源需求服务的能源站
[22]	拥有一定能量生产和转换设备的综合柔性负荷组织实体,能够向部分区域用户供应多种能源,同时聚合用户综合需求响应资源
[23]	基于综合能源服务商,考虑综合需求响应与风险规避,满足用户不同类型用能需求的能源站

1.1 能源综合服务实体站

能源综合服务站的规划配置决定了能源综合业务的效率与品质^[19]。当前有关实体站的文献大多都在探讨其选址定位^[24-26]、设备选型^[25,27-28]、容量配置^[25-29]、站网协同规划^[24,26]等问题,以建成一个实体新站为目

标。较多文献都采用上下两层规划，大致规划流程如图1所示。文献[26]选择双层规划，上层采用改进遗传算法确定分布式能源的安装位置、容量及布置线路，下层采用自适应粒子群算法求出微型燃气轮机和储能的调度值。文献[30]采用双层规划对实体站进行站网协同优化，并且考虑天热气管道的危险性而增设了街道约束条件。文献[27]从用户能源需求出发，构成涵盖所有可行的转换和存储设备的实体站架构。文献[28]构想了一种基于配电网、天然气网和交通网的实体站，可满足电、气、冷、热、交通多种负荷的需求。文献[31]通过冷热负荷等效能距来优化实体站的选址，减少了管道铺设的成本。但是这些文献在规划实体站时都没有将数据中心纳入考虑范围。数据中心可以通过数据负荷转移实现电网各节点电负荷量的快速传递^[32]，利用其这个功能特性在下层规划时优化实体站各设备和网络的调度值。因此在之后的能源综合服务站规划中，数据中心的位置与计算处理容量也将是重要的利用条件。

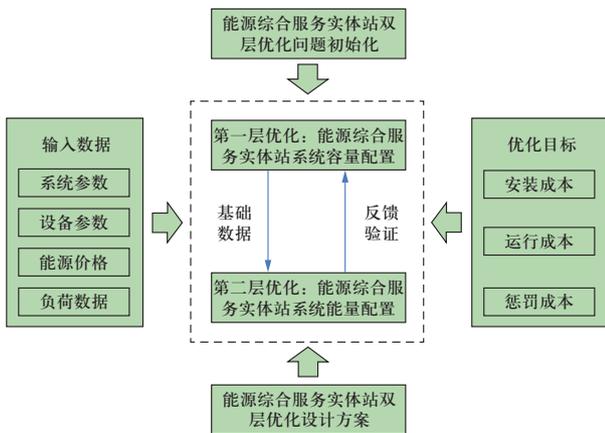


图1 实体站双层优化设计方法

Fig. 1 Double layer optimization design method for entity station

1.2 能源综合服务虚拟站

能源系统正面临集中开发向分布式利用转型^[33]，在传统电力系统中，为了方便统一调度可再生能源，可通过建设虚拟电厂对相关控制资源进行虚拟化。文献[34]将虚拟电厂定义为一种可集中控制分布式能源的信息通信系统。虚拟电厂在集中控制结构下，其全部决策由控制协调中心制定^[35]。在能源互联网的建设背景下，各分布式模块不只停留在对电能的利用，多种能源的出现使得控制难度进一步加大。在交易市场中，除了电力市场，还出现了热能、天然气等市场。为了实现传统电网向能源互联网的升级，虚拟电厂也

需要朝着能源综合服务虚拟站的方向转变^[36]。与虚拟电厂相比，虚拟站基于对综合能源信息物理资源的抽象与整合，即多能分布式能源站，可实现客观的统一资源调度。多种能源形式的分布式单元通过信息系统集合起来，灵活参与各种能源市场的交易。虚拟站中的每一部分均可通过信息控制中心相互联系，控制中心多采用能量管理系统（energy management system, EMS）。文献[37]构建了由本地层、能源中心层、网络层和系统层共同组成的分层分布式多代理结构模型，能源虚拟站可以通过EMS远程调度多能设备，也可通过变电站内分布式数据中心实现本地调度。文献[38]设想变电站同时作为数据的集成中心和能源的调控中心，实现传统电网向能源互联网的转变。

图2为虚拟站能量流-信息流-业务流多层次协调运行架构，利用变电站有限的空间场地与充沛电力资源在变电站内部建设分布式数据中心，可以在存储数据的同时实现数据本地化处理，选择性地将特征结果上传数据云，减少数据云存储和通信传输的压力^[39]。通过CPS来调度周边的冷热电联产（combined cooling heating and power, CCHP）燃气站与光储充电站，为供电范围内的不同用户按照各自用能需求提供电、气、热、冷多种供能服务。同时设置综合能源服务商代理与用户用能监测代理，分别管理区域内的能源虚拟站与用户的用能情况，制定合理的运行方案，从而降低传统集中式控制的巨大代价^[40]。

1.3 实体站与虚拟站适用场景比较

实体站与虚拟站的特征对比如表2所示。

表2 实体站与虚拟站的特征比较
Table 2 Characteristic comparison between entity station and virtual station

能源综合服务 站类型	建设与升级	通信调度 难度	适用 模型	需要解决的 问题
实体站	前期投入大，升级改造较难	可采用统一的通信协议，协调调度较易	能源集线器	选址定容需考虑地价、管道线路，同时牵涉到系统规划
虚拟站	前期投入小，升级改造较易	各设备间通信协议不尽相同，协调调度较难	多能流网络	平台建设 通信可靠性

实体站建设初期需要确定一个具体的架构方案，通过改变既定设备的容量来改造升级^[27]。供能方案

若发生变化, 实体站的改造升级较为困难。虚拟站是通过CPS聚合的虚拟能源设备组合体, 可针对不同用户群自由选择所需的能源模块^[41], 更适宜升级改造。当一个地区有着多个同类型能源企业时, 就会出现一定程度的电源规模过剩^[42], 可以利用变电站在电网中的核心位置, 调度周围资源构建一个虚拟站, 避免能源浪费和巨大的建设投资。分布式能源往往靠近负荷侧, 虚拟站调度周边模块就会更加便利。实体站规划建设问题主要为选址与定容, 需要考虑地价、管道线路的布置, 同时牵涉多能系统的规划。新建实体站的各设备管网可采用同种类型的通信协议, 协同联络更为便捷, 从而满足信息物理深度耦合的发展趋势。虚拟站规划建设不需要重新布置线路, 主要考虑通信网络的可靠性, 搭建出一个云管控平台。虚拟站利用已有变电站和分布式数据中心结合改造。虚拟站不需要对全局进行信息监控, 但各个分散的模块采用不同类型的通信网络, 统一调度难度较大, 可能出现通信干扰等问题。

实体站内部设备主要实现多能的转换与存储, 它们之间空间距离较短, 可采用能源集线器模型来表示能源输入输出情况^[43]。虚拟站更多的是各种能源网络

之间的耦合, 是多能流网络的建模。文献[44]建立了区域热电系统的面向对象模型, 提出了元件层面的信息物理融合形态, 以分散决策的形式实现多能流的优化。但电流、热流、气流在传输过程中物理机制差异明显, 热、气网络的一些方程在电网模型中找不到相似表述^[45], 以变电站为核心的能源综合服务站精细化建模仍是不小的难题。

2 能源综合服务站优势分析

目前, 能源综合服务站没有形成完整的科学方法论和成套模型, 难以在具体实践中进行有效的指导。在理论研究层面, 对于能源综合服务站规划建设的研究不够深入, 较少有文章专门探讨建设的优势。下面将从工业园区、数据中心、商业园区用户3个典型场景分析能源综合服务站建设的优势。

2.1 工业园区

工业园区是以工业负荷为主的复杂能源系统, 厂房将电力、天然气和热能供应服务于各类型负荷, 能量转换过程大多涉及热的梯级利用^[46]。工业用户热电

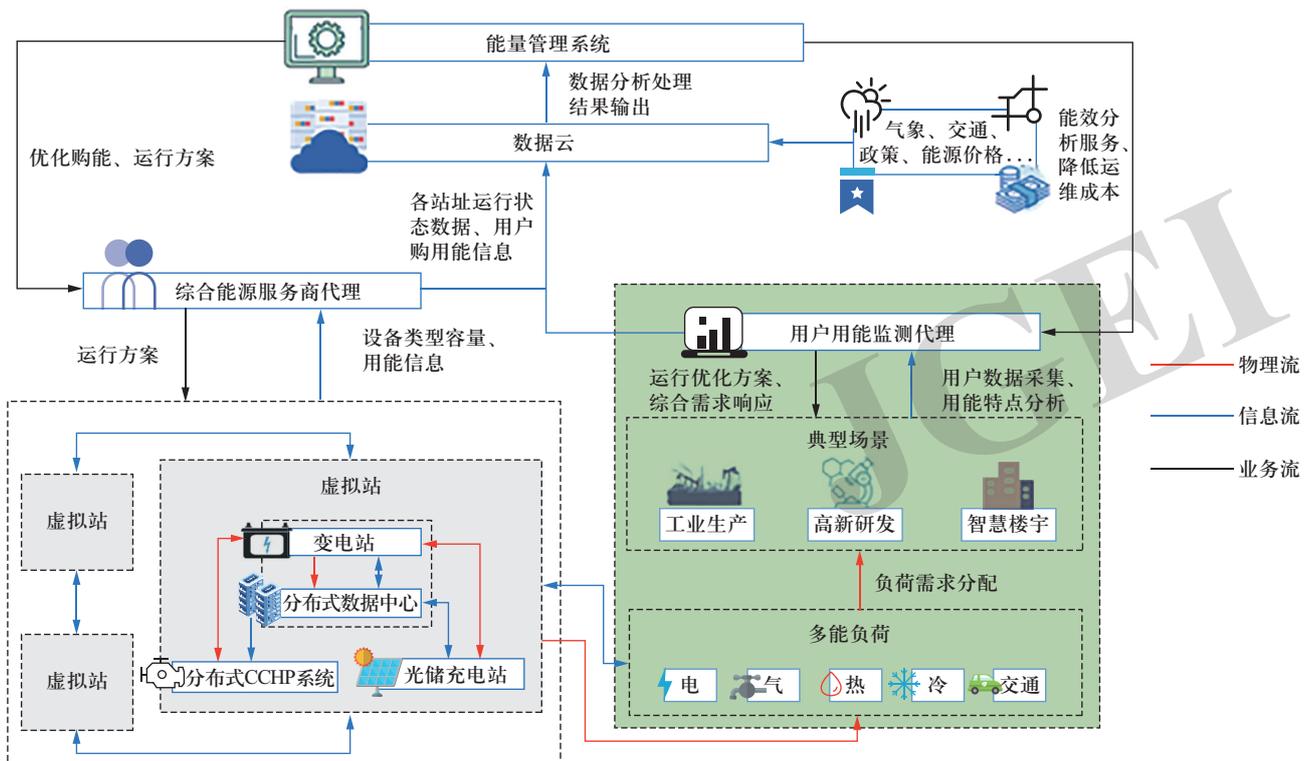


图2 虚拟站能量流-信息流-业务流多层次协调运行架构

Fig. 2 Multi-level coordinated operation architecture of virtual station

比高、热电波动小，用电电价高，对能源成本较为敏感^[47]。园区中有色化工、冶炼等高耗能行业的总成本大部分为用能成本^[48]，工厂用能优化升级、节能减排的需求强烈。同时，由于变电站容量有限，工业生产所需的电能在某些时段受到较大限制，因而可通过其他能源供应方式减小对生产造成的影响^[49]。

根据上述工业园区的用能特点、负荷特性和存在问题可知，建设能源综合服务站优势突出，可利用不同设备的多能转化和协同配合来提高系统能效，降低工业区内各用户的运行费用。考虑工业园区的用能规律后，建设工业园区场景下能源综合服务站的主要设备可选定为燃气轮机、燃气锅炉、余热锅炉、地源热泵机组、光伏机组、储能电池、吸收式制冷机、冰蓄冷装置等^[46,50-52]。

此外，工业系统数据更新频率高、数据量大、响应要求高等特点给信息通信系统带来更多挑战^[53]。在工业园区能源综合服务站建设背景下，传感、监控、通信等各种新软硬件技术的应用使得收集的数据量越来越大，要求数据采集能力不断提高^[54]。在海量工业数据中提取有效信息需要依靠服务器强大的分析能力，而工业企业自我配置的耗资巨大，能源综合服务站的建设可为园区内众多企业提供数据分析服务，实现共赢。

2.2 数据中心

区别于居民区、工业区，数据中心属于不间断运行的高能耗负荷，需要制冷设备来降低内部温度，冷却用能约占总能耗的40%^[32]。当前中国数据中心能耗利用效率（power usage effectiveness, PUE）为1.5~1.8^[55]。随着网络节点和数据的不断增多，数据中心的计算设备产生的能耗也不断提升^[56]，国家出台规定新建大型及以上的数据中心PUE应低于1.4。据估算，数据中心将在2025年消耗全球电力总量的20%以上^[57]，如何降低数据中心的电费、优化能源管理成为关键问题。

数据中心可视为产消者，具有很大的热回收潜力^[58]，文献[59]设计了一个利用数据中心的余热来为周边建筑提供冷热服务的系统。有研究采用新能源为数据中心供电，例如惠普实验室建设了一个由太阳能电池板提供部分电能的数据中心^[60]。然而，可再生能源具有间歇性和随机性，不能完全满足数据中心高可靠性的要求^[61]。文献[62]通过功率控制和负荷均衡实现产电和耗电曲线的匹配，提高混合供电的利用率，减少褐

色电能使用量。文献[63]为容错级数据中心设计了一个由各种分布式能源单元集成的能源综合服务虚拟站，可满足数据中心日常的电、热、冷负荷需求。同时此数据中心的PUE由二级提升为一级，年碳排放量减少40%以上，经济与环境价值均优于传统供能方式。

与传统供电方式相比，多能系统能有效提高数据中心能源利用率、降低其运行费用。建设配有燃气内燃机、光伏、储能电池、热泵、余热锅炉等设备的能源综合服务站，辅以多能流调控手段可较好保证数据中心的供能可靠性^[64]。

2.3 商业园区

商业园区负荷大且稳定，对高质量能源服务需求较大^[65]，要保证较高的温度舒适度。建筑冷热系统和热水系统都是为了满足住户对温度舒适度要求而利用建筑虚拟储能建立的。商业园区聚集大量楼宇，用能相对集中。办公型用户一般只有电、热、冷需求，而酒店、餐饮型用户对电、气、热、冷都有需求^[66]。文献[67]面向能源服务商用能托管服务，通过调节楼宇冷热功率来维持用户温度舒适度指标。

商业园区通常会在建筑屋顶安装光伏模块，由于规模相对较小，往往鼓励就地消纳供电。剩余电能则流入储能设备中，既参与调峰又为用户带来经济收益^[68]。商业楼宇主要采用中央空调制冷，夏季负荷攀升。国外商业园区通过控制中央空调系统周期暂停用电和投资建设蓄冷系统进行负荷调控，既保证了高舒适度要求又减少为负荷增长而增加的装机容量和输配电容量^[69]。文献[70]构建了考虑灵活热电比和综合需求响应的商业园区能源综合服务站，有效降低了用能成本和负荷峰谷差，其中峰谷差与传统供能方式相比降低了6.43%，保证了系统的稳定性。由此可见，对于较高能源服务要求的商业园区来说，构建多能互补、负荷调度灵活的能源综合服务站优势显著。

3 能源综合服务站关键技术

能源综合服务站的建设运行需要在地理位置、设备配置、信息通信、增值业务等多个方面进行融合。本文从配置融合、信息通信、业务融合3个角度进行论述，其中配置融合为能源综合服务站规划建设提供了支撑，信息通信为数字管控提供了路径，业务融合为协调运行提供了方案。

3.1 配置融合

用电负荷的不断增长使得变电站出现负荷拥堵等问题,需要对变电站综合扩建,而由于变电站空间等限制,改造很可能延期完成而影响正常的供电计划。对于原有的变电站和馈线架构,安装新的馈线要额外投入大量资源,文献[71]提出了使用配电馈线作为微电网的新思路,文献[72]搜索分布式设备最佳位置后将其安装到钢铁厂关联总线上,缓解了变电站堵塞问题。将变电站从电力系统跨越到综合能源系统是解决变电站扩建升级难题的有效办法,为变电站演化为能源综合服务站提供了可行方案。

当前中国东部城市大量依赖西部地区的一次能源,一旦输送通道发生故障,本地机组有限的备用容量将直接导致城市电力瘫痪,而多能互补的能源综合服务站就可应对此危机。在风、光、土地等资源丰富的地区,发展分布式能源、储能、充换电站具有很大的潜力。文献[73]介绍了一种城市光伏充电站,并对其能量流进行了评估,验证了在城市发展光伏、储能和电动汽车充电融合技术的可行性。文献[74]分析了利用变电站的屋顶和空地融合数据中心、光充储电站、5G基站的可行性,并给出了具体的配置方法及运行策略。文献[75]提出了多站融合的综合评价层次模型,可为多站融合的规划与运营提供参考。电化学储能具有能量密度大、建设周期短、站址适应性强等优点^[76],其中铅酸电池的建设成本较低,因此适合作为变电站的首选储能方式。变电站具有离负荷中心较近的特点,可满足燃气分布式CCHP系统并网运行时靠近供电区域主配电室或负荷中心的要求^[77]。同时燃气分布式电源布置灵活,因此可将其建设在变电站周边,提高信息管控与能源供应的可靠性,扩大供能半径。

3.2 信息通信

目前国内变电站信息网络多基于IEC61850标准,采用“三层设备,两层网络”结构^[78],变电站各信息系统独立布置、应用功能分离^[79]。大量物理设备与数据中心联网后,集中控制的复杂性很高,而控制中心与变电站协同控制更为可行^[80]。变电站可采用分层分布的网络结构实现通信的可管、可控^[81]。随着物理和信息的深度耦合,中国电力系统建设了以总线通信、接入网和骨干通信网为主,无线通信为辅的电力通信专网,几乎覆盖了所有重要的变电站^[82]。文献[82]采用低功耗广域网络物联网技术,与现有电力通信专网

融合,形成运营级的能源物联专网。变电站可为数据中心提供场地、基础设施等资源,但由于空间限制,建设数据中心的能力有限。文献[83]提出基于变电站的分布式云计算架构,将计算资源下沉业务密集处,提升计算性能。与4G基站相比,5G通信基站的能耗更高且覆盖半径较小,而电力与通信设备在一定条件下可共享杆塔空间,通信设备可利用变电站的资源就近建设^[84]。同时能源综合服务站的储能装置相当于通信设备的不间断电源,大大保证了通信系统的可靠性。

3.3 业务融合

能源综合服务站可为用户提供优质的电能质量和能源综合业务,并降低运维成本。文献[47]考虑用能规模、支付水平、能源需求等因素后,将工业企业、公共建筑、大型园区定位为能源综合服务的理想客户,可长期合作。能源综合服务站可以实时监控客户的用能情况,为客户优化用能方案。文献[20]计及能量转换设备产生的碳排放量和综合能源服务商响应,降低电力系统的碳排放和运行成本。用户用能具有多变性,分析用户用能习惯与偏好,可建立负荷与用户点对点的映射关系^[85],提供一对一的能源综合服务。文献[86]提出综合能源服务商与用户利益风险共同体,给出3种捆绑销售电热套餐,实现服务商利润、用户满意度和风险的平衡。文献[87]设立能源互联网运营商作为上层智能协调器,完成虚拟电厂向虚拟电力系统的升级,使运营商能对能源市场交易进行可行性评估。

从发展能源综合服务的角度来看,电网企业具有相对完善的技术储备和资源储备,可以融入互联网与信息产业开展杠杆业务^[88],利用现有资源开发能源综合服务数据平台^[89],为周边用户提供定制的各类能源综合服务。欧洲政府制定了很多政策和措施来鼓励企业创新^[90]。美国亦是如此,美国太平洋煤气电力公司、爱迪生联合电力公司^[91]就是政策支持下积极筹建综合能源服务商的成功案例。中国有关部门也应出台相应政策开展能源综合业务,提升电网企业自身竞争力。

4 应用案例

4.1 南京江北能源综合服务站示范项目

南京江北能源站在“变电站+储能+数据中心”三站合一的组合上积极探索,由供电区、储能区、供冷区、数据中心区四大区域构成。同时,采用建筑融

合、供电融合、通信融合、数据融合设计，实现多站融合节地节能的综合效益。该站将电能作为多能转换的中间介质，配置集中式供冷系统，满足数据中心的电、冷负荷需求，未来将实现科研生产厂房及办公楼宇的供冷/热。南京江北能源综合服务站在集中供冷、数据计算、杆塔租赁等方面积极开展能源综合服务业务，努力打造清洁低碳、可靠高效的能源信息枢纽与多方共赢的增值服务平台。

4.2 国网合肥始信路“七站融合”示范站

国网合肥始信路“七站融合”示范站包含换电站、充电站、光伏电站、储能站、数据中心站、5G基站、北斗地基增强站，占地约10 000 m²。站内容量为88 kW的屋顶光伏电站全年可发电84 MWh；1.34 MW储能电站利用退役电池，节约投资190万元。与传统电厂相比，该示范站每年可节约26 t标准煤，节省14.6万元的用电成本。

4.3 苏州110 kV香山能源综合服务站

苏州110 kV香山能源综合服务站由一座新建110 kV变电站、34.32 kW屋顶光伏发电站、3台1 kW风电机、120 kW充电桩系统、2台智慧路灯及多功能气象站组成，占地约4000 m²。预计该站投运后，光伏和风机年发电量可达42.53 MWh。该能源综合服务站最大化利用香山变信息通信资源，将多能设备运行及控制信息上传至上层调度系统，通过远程监管完成优化控制。

4.4 江苏溧阳中关村创智园能源综合服务站综合能源系统

江苏溧阳中关村创智园能源综合服务站综合能源服务系统基于新能源开发与利用、智能传感控制设备、园区业务流程，利用大数据、人工智能与物联网技术，建立万物互联、数据互通、人机互动、协同互济的智慧园区管理系统，构建能源综合服务业务架构，实现建筑、设备、系统、服务和管理的优化组合，赋予园区安全、便利、高效、节能的管理效能。该系统可实现对用户用能的实时监控，分析用户用能习惯与偏好，为用户提供更为优质的能源综合服务。

5 展望

5.1 变电站向能源综合服务站的演化路径

现有的以变电站演变成的能源综合服务站虽然某

种意义上实现了多站融合，但依旧只停留在对电能的利用，并未实现涉及天然气、热能等资源站点的融合，未来变电站与P2G、分布式燃气站、储热站、热泵、冰蓄冷等气热冷资源如何融合、按照何种顺序融合仍未有确切答案。

在能源与信息深度融合的背景下，需要考虑能源站及各能源网的安全稳定、多能协调供应能力、信息通信层抵御网络攻击的能力及设备故障下可靠供能的能力等方面，明确变电站向能源综合服务站演进的不同组合模式及目标。同时也要考虑技术发展及设备成本变化趋势，得出在不同场景下变电站向枢纽型能源综合服务站的演进路线和规律。

5.2 实体站与虚拟站共同规划的综合能源系统

能源综合服务站的规划目标，需要考虑不同业务的多个维度，比如不同能源的丰富程度，信息或物理系统的扰动等。如何在电网CPS规划中，充分利用能源综合服务站的区位、配置等优势，通过权衡不同目标，形成最优设备配置和站点组合方案，成为当前面临的一个重要问题。

对已有建成的变电站且其周围拥有多种能源资源的场景，建设能源综合服务虚拟站来调度各种站址资源可以扩大供能范围，同时一定程度避免能源规模过剩和建设实体新站巨大的初始投资。而对于未开发的新区，若其拥有丰富的风、光、水、土地等资源，可以投资建设能源综合服务实体站。变电站等大型站的选址规划需考虑地理条件的不确定性，可与地理信息系统相结合^[92]。文献[93]提取了地形、周围变电站情况等特征，采用卷积神经网络进行变电站的预选址，再针对城市电缆环网进行变电站和网架的联合规划，为能源综合服务站的选址提供了深度学习算法方面的新思路。涵盖实体站、虚拟站的综合能源系统，在满足区域用能全覆盖时使建设运行费用最小，同时也可考虑从能源生产源头到负荷用能全过程的碳排放，实现经济环境最优。

5.3 电网公司向综合能源服务商转变

相比于传统的变电站，能源综合服务站除了变电功能外，还实现了信息集成共享，能源协同调配等功能。复杂场景下，电力业务与其他能源业务的耦合分析尚未成熟，再叠加物联网建设背景下数据传输与业务传输的流动，整体分析更加复杂，呈现非线性、多耦合特征。

当变电站向能源综合服务站转变时,电网公司也转变为综合能源服务商。降低用能峰谷差额,减少自身售能风险,提高自身供能经济性仍是能源服务商要努力实现的目标。制定何种能源销售套餐来调动用户电能、热能、冷能的柔性调节能力以实现需求响应将是未来重要的研究内容。

5.4 能源综合服务站数字化赋能

能源综合服务站终端采集设备的广泛普及势必导致获取数据信息量的大幅增加。用户用能行为具有一定的规律性,能源综合服务站提供的多能负荷按用能特征可以分为工业园区、高新技术区、商业区、居民区等典型场景,基于大数据分析的负荷聚类方法可实现用户较为精确的分类,为用户提供合理的综合需求响应多能套餐,实现能源综合服务站数字化赋能。

用户的用能行为也存在较强不确定性,与气象、季节、地区、政策、经济水平等因素密切相关。大规模风、光分布式电源的接入,以及多种能源物理特性与时间尺度的较大差异,使得用户的用能行为更加多元与复杂。为了精准匹配用户多元化的用能需求,数据驱动方法能够为能源综合服务站数字化赋能提供有效路径。

此外,多能源交易市场的建立有利于适应能源综合服务站分散化发展趋势。除了提供用能监测、运维优化、故障诊断等数字化增值服务,完全分散式的能源综合服务虚拟站可以在分析用户用能大数据的同时保证用户隐私信息,是未来能源站的重要研究方向。

6 结语

随着“双碳”目标的提出,以变电站现有资源为基础,涵盖多功能单位的能源综合服务站将对规划综合能源系统的新型生态架构产生深远影响。本文首先提出了能源综合服务实体站和虚拟站2种形式的规划建设特点,其中实体站主要考虑地价与管道线路配置,解决选址与定容问题;虚拟站主要考虑通信可靠性,建设云管控平台。其次分析了能源综合服务站配置融合、信息通信与业务融合,能够有效支撑规划建设、数字管控与协调运行的目标。最后给出了工程应用案例,实现从架构融合向业务融合的转变。本文通过对变电站向能源综合服务站演化趋势的探讨,为能源互联网的规划建设、业务转型和数字赋能提供参考。

参考文献

- [1] 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(in Chinese).
- [2] 文云峰,瞿小斌,肖友强,等. 耦合能量枢纽多区域电—气互联能源系统分布式协同优化调度[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(9): 22-30.
WEN Yunfeng, QU Xiaobin, XIAO Youqiang, et al. Distributed coordinated optimal dispatch of multi-regional electricity-gas integrated energy systems with energy hubs[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(9): 22-30(in Chinese).
- [3] 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(in Chinese).
- [4] 崔恒志,杨斌,唐一铭,等. 多站融合背景下综合性能源枢纽的架构与方案设计[J]. 供用电, 2020, 37(8): 16-20.
CUI Hengzhi, YANG Bin, TANG Yiming, et al. Design of the architecture and project of comprehensive energy hub under the background of multi-station integration[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(8): 16-20(in Chinese).
- [5] 陈岩,靳伟,王文宾,等. 多站融合供电系统辅助调峰自律运行调控策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(20): 57-65.
CHEN Yan, JIN Wei, WANG Wenbin, et al. Multi-station fusion power supply system to assist peak regulation strategy[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20): 57-65(in Chinese).
- [6] 中国储能网. 全国综合能源服务站落地项目汇总[EB/OL]. (2021-03-31) [2021-04-16]. <http://www.escn.com.cn/news/show-1197404.html>.
- [7] 赵俊华,文福拴,薛禹胜,等. 电力CPS的架构及其实现技术与挑战[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(16): 1-7.
ZHAO Junhua, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. Cyber physical power systems: architecture, implementation techniques and challenges[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(16): 1-7(in Chinese).
- [8] WANG Q, PIPATTANASOMPORN M, KUZLU M, et al. Framework for vulnerability assessment of communication systems for electric power grids[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(2): 477-486.
- [9] Germany Trade & Invest. Industrie 4.0: Smart manufacturing for the future[R]. 2013.

- [10] 郭庆来, 辛蜀骏, 孙宏斌, 等. 电力系统信息物理融合建模与综合安全评估: 驱动力与研究构想[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(6): 1481-1489.
GUO Qinglai, XIN Shujun, SUN Hongbin, et al. Power system cyber-physical modelling and security assessment: motivation and ideas[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1481-1489(in Chinese).
- [11] LEE E A. Cyber physical systems: design challenges[C]//2008 11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC). May 5-7, 2008, Orlando, FL, USA. IEEE, 2008: 363-369.
- [12] National Energy Technology Laboratory. Modern grid initiative: a vision for the modern grid[R]. 2007.
- [13] 刘晓鸥, 葛少云. 区域综合能源系统的能效定义及其相关性分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(8): 8-18.
LIU Xiaoou, GE Shaoyun. Definition and correlation analysis on energy utilization efficiency of regional integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(8): 8-18(in Chinese).
- [14] 杨经纬, 张宁, 王毅, 等. 面向可再生能源消纳的多能源系统: 述评与展望[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 11-24.
YANG Jingwei, ZHANG Ning, WANG Yi, et al. Multi-energy system towards renewable energy accommodation: review and prospect[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 11-24(in Chinese).
- [15] 黄文焘, 王萧博, 郜能灵, 等. 电热微网能量耦合转换模型与梯级优化利用方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(21): 6804-6815.
HUANG Wentao, WANG Xiaobo, TAI Nengling, et al. Energy coupling conversion model and cascade utilization method for microgrid with heat and power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(21): 6804-6815(in Chinese).
- [16] 加鹤萍, 丁一, 宋永华, 等. 信息物理深度融合背景下综合能源系统可靠性分析评述[J]. 电网技术, 2019, 43(1): 1-11.
JIA Heping, DING Yi, SONG Yonghua, et al. Review of reliability analysis for integrated energy systems with integration of cyber physical systems[J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 1-11(in Chinese).
- [17] 王永真. 能源互联网下综合能源服务的新特征、新挑战[J]. 能源, 2020(6): 64-66.
- [18] 王静雯, 李华强, 李旭翔, 等. 综合能源服务效用模型及用户需求评估[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(2): 411-425.
WANG Jingwen, LI Huaqiang, LI Xuxiang, et al. Utility model and demand assessment method of integrated energy service[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(2): 411-425(in Chinese).
- [19] LI C, LI P, YU H, et al. Optimal planning of community integrated energy station considering frequency regulation service[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021, 9(2): 264-273.
- [20] 胡静哲, 王旭, 蒋传文, 等. 计及综合能源服务商参与的电力系统低碳经济调度[J]. 电网技术, 2020, 44(2): 514-522.
HU Jingzhe, WANG Xu, JIANG Chuanwen, et al. Low-carbon economic dispatch of power system considering participation of integrated energy service providers[J]. Power System Technology, 2020, 44(2): 514-522(in Chinese).
- [21] 戚艳, 刘敦楠, 徐尔丰, 等. 面向园区能源互联网的综合能源服务关键问题及展望[J]. 电力建设, 2019, 40(1): 123-132.
QI Yan, LIU Dunnan, XU Erfeng, et al. Key issues and prospects of integrated energy service for energy Internet in park[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(1): 123-132(in Chinese).
- [22] 林俐, 蔡雪瑄. 基于风电消纳需求的综合能源服务商源荷协同运行策略[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2517-2527.
LIN Li, CAI Xuexuan. Source-load cooperative operation strategy of integrated energy service provider based on wind power accommodation demand[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2517-2527(in Chinese).
- [23] 武庚, 武庆国, 王昊婧, 等. 考虑风险规避的综合能源服务商能源购置策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(6): 12-20.
WU Geng, WU Qingguo, WANG Haojing, et al. Energy purchasing strategy of multi-energy service provider considering risk aversion[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(6): 12-20(in Chinese).
- [24] 易文飞, 俞永增, 张艺伟, 等. 基于p-中位模型的区域综合能源系统能源站优化规划[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(4): 107-112.
YI Wenfei, YU Yongzeng, ZHANG Yiwei, et al. P-Median model based optimal planning of energy station for regional integrated energy systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(4): 107-112(in Chinese).
- [25] 王丹, 孟政吉, 贾宏杰, 等. 面向新型城镇的能源互联系统规划关键技术研究及展望[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(14): 16-28.
WANG Dan, MENG Zhengji, JIA Hongjie, et al. Research and prospect of key technologies for energy interconnection system planning for new-type towns[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(14): 16-28(in Chinese).
- [26] 白牧可, 唐巍, 吴聪, 等. 基于热网-电网综合潮流的用户侧微型能源站及接入网络优化规划[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 84-93.
BAI Muke, TANG Wei, WU Cong, et al. Optimal planning based on integrated thermal-electric power flow for user-side micro energy station and its integrating network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 84-93(in Chinese).
- [27] 管霖, 陈鹏, 唐宗顺, 等. 考虑冷热电存储的区域综合能源站优化设计方法[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 2934-2943.
GUAN Lin, CHEN Peng, TANG Zongshun, et al. Integrated energy station design considering cold and heat storage[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 2934-2943(in Chinese).

- [28] 王珏莹, 胡志坚, 谢仕炜. 计及交通流量调度的智慧综合能源系统规划[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(23): 7539-7555.
WANG Jueying, HU Zhijian, XIE Shiwei. Smart multi-energy system planning considering the traffic scheduling[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(23): 7539-7555(in Chinese).
- [29] 吴桂联, 林婷婷, 郑洁云, 等. 大型园区综合能源系统能源站优化配置[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(9): 116-122.
WU Guilian, LIN Tingting, ZHENG Jieyun, et al. Optimal allocation of energy stations in large-scale park integrated energy system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(9): 116-122(in Chinese).
- [30] 黄伟, 柳思岐, 叶波. 考虑源-荷互动的园区综合能源系统站-网协同优化[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(14): 44-53.
HUANG Wei, LIU Siqi, YE Bo. Station-network cooperative optimization of integrated energy system for park considering source-load interaction[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(14): 44-53(in Chinese).
- [31] 刘洪, 郑楠, 葛少云, 等. 考虑负荷特性互补的综合能源系统站网协同规划[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(1): 52-64.
LIU Hong, ZHENG Nan, GE Shaoyun, et al. Station and network coordinated planning of integrated energy systems considering complementation of load characteristic[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(1): 52-64(in Chinese).
- [32] 曹晓峻, 高赐威, 李德智, 等. 数据网络与电力网络混合运行建模及其参与系统经济运行[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(5): 1448-1456.
CAO Xiaojun, GAO Ciwei, LI Dezhi, et al. Mixed operation model of data network and power network and its participation in the economic operation of power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1448-1456(in Chinese).
- [33] 宋蕙慧, 于国星, 曲延滨, 等. Web of Cell体系: 适应未来智能电网发展的新理念[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(15): 1-9.
SONG Huihui, YU Guoxing, QU Yanbin, et al. Web of cell architecture—new perspective for future smart grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(15): 1-9(in Chinese).
- [34] BRAUN M, STRAUSS P. A review on aggregation approaches of controllable distributed energy units in electrical power systems[J]. International Journal of Distributed Energy Resources, 2008, 4(4): 297-319.
- [35] 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(in Chinese).
- [36] YIN S R, AI Q, LI J M, et al. Energy pricing and sharing strategy based on hybrid stochastic robust game approach for a virtual energy station with energy cells[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(2): 772-784.
- [37] 孟明, 马辰南, 薛宛辰, 等. 基于多代理的综合能源系统分层分布式能量协调方法[J]. 现代电力, 2021, 38(2): 129-139.
MENG Ming, MA Chennan, XUE Wanchen, et al. A multi-agent based hierarchical distributed energy coordination method for integrated energy system[J]. Modern Electric Power, 2021, 38(2): 129-139(in Chinese).
- [38] 胡帆. 常规变电站如何向综合能源站转型升级[J]. 中国电力企业管理, 2018(1): 54-57.
- [39] 李昭昱, 艾芊, 张宇帆, 等. 数据驱动技术在虚拟电厂中的应用综述[J]. 电网技术, 2020, 44(7): 2411-2419.
LI Zhaoyu, AI Qian, ZHANG Yufan, et al. Application of data-driven technology in virtual power plant[J]. Power System Technology, 2020, 44(7): 2411-2419(in Chinese).
- [40] 季珉杰, 张沛超. 信息物理融合的主动配电网分层交易式能量管理[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(16): 4668-4678.
JI Minjie, ZHANG Peichao. Hierarchical transactive energy management of active distribution network based on cyber physical system approach[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(16): 4668-4678(in Chinese).
- [41] 谈金晶, 李扬. 多能源协同的交易模式研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(22): 6483-6497.
TAN Jinjing, LI Yang. Review on transaction mode in multi-energy collaborative market[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(22): 6483-6497(in Chinese).
- [42] 王睿卓, 刘怀东, 崔丽瑶, 等. 计及综合效率评价的火-风-储-高载能企业虚拟电厂成员选择模型[J]. 电网技术, 2021, 45(5): 1942-1951.
WANG Ruizhuo, LIU Huaidong, CUI Liyao, et al. Member selection model of thermal-wind-storage-eie virtual power plant considering comprehensive efficiency evaluation[J]. Power System Technology, 2021, 45(5): 1942-1951(in Chinese).
- [43] 黄武靖, 张宁, 董瑞彪, 等. 多能源网络与能量枢纽联合规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(18): 5425-5437.
HUANG Wujing, ZHANG Ning, DONG Ruibiao, et al. Coordinated planning of multiple energy networks and energy hubs[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(18): 5425-5437(in Chinese).
- [44] 韩赫, 张沛超, 孙宏宇, 等. 能量流-信息流-价值流协同的区域热电系统分散式能量管理方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5454-5467.
HAN He, ZHANG Peichao, SUN Hongyu, et al. Decentralized energy management method for district heat-electric system based on synergies of energy-information-value flows[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5454-5467(in Chinese).
- [45] 殷爽睿, 艾芊, 曾顺奇, 等. 能源互联网多能分布式优化研究挑战与展望[J]. 电网技术, 2018, 42(5): 1359-1369.

- YIN Shuangrui, AI Qian, ZENG Shunqi, et al. Challenges and prospects of multi-energy distributed optimization for energy Internet[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(5): 1359-1369(in Chinese).
- [46] 徐航, 董树锋, 何仲潇, 等. 考虑能量梯级利用的工厂综合能源系统多能协同优化[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(14): 123-130.
- XU Hang, DONG Shufeng, HE Zhongxiao, et al. Multi-energy cooperative optimization of integrated energy system in plant considering stepped utilization of energy[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(14): 123-130(in Chinese).
- [47] 窦金月. 区域综合能源服务商业模式设计及成本效益分析[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2019.
- DOU Jinyue. Business models design and cost-benefit analysis of regional integrated energy services[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019(in Chinese).
- [48] 郭健, 曹军威, 杨洋, 等. 面向用户需求的区域能源互联网价值形态研究框架及应用分析[J]. *电网技术*, 2020, 44(2): 493-504.
- GUO Jian, CAO Junwei, YANG Yang, et al. User demand oriented research framework of value morphology for REI and its application analysis[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(2): 493-504(in Chinese).
- [49] 陈东文. 工业园区综合能源站多能协同与储能规划研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- CHEN Dongwen. The research of the integrated energy station planning of multi-energy coordination and energy storage in industrial parks[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018(in Chinese).
- [50] 孙可, 何德, 李春筱, 等. 考虑冰蓄冷空调多模式的工厂综合能源系统多能协同优化模型[J]. *电力建设*, 2017, 38(12): 12-19.
- SUN Ke, HE De, LI Chunxiao, et al. Multi-energy cooperative optimization model of factory IES considering multi-model of ice storage[J]. *Electric Power Construction*, 2017, 38(12): 12-19(in Chinese).
- [51] CAO S M, ZHENG Y C, CAO K, et al. Planning and design case analysis of integrated energy station for urban Internet of energy[C]//2020 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I&CPS Asia). July 13-15, 2020, Weihai, China. IEEE, 2020: 162-166.
- [52] 赵曰浩. 面向工业园区的综合能源系统的协调控制研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2019.
- [53] 胡毅, 于东, 刘明烈. 工业控制网络的研究现状及发展趋势[J]. *计算机科学*, 2010, 37(1): 23-27.
- HU Yi, YU Dong, LIU Minglie. Present research and developing trends on industrial control network[J]. *Computer Science*, 2010, 37(1): 23-27(in Chinese).
- [54] ZHONG C L, LI K M, XU M Z, et al. Real time monitoring and online analysis of integrated energy in industrial park based on SVG and Ajax[C]//2018 3rd International Conference on Smart City and Systems Engineering (ICSCSE). December 29-30, 2018, Xiamen, China. IEEE, 2018: 605-608.
- [55] 王奖, 张勇军, 李立涅, 等. 数据中心园区能源互联网的关键技术与发展模式[J]. *中国工程科学*, 2020, 22(4): 65-73.
- WANG Jiang, ZHANG Yongjun, LI Licheng, et al. Key technologies and development modes of park energy Internet in data centers[J]. *Strategic Study of CAE*, 2020, 22(4): 65-73(in Chinese).
- [56] 胡杰, 孙秋野, 胡旌伟, 等. 信息能源系统自-互-群立体协同优化方法[J]. *全球能源互联网*, 2019, 2(5): 457-465.
- HU Jie, SUN Qiuye, HU Jingwei, et al. Three-dimensional self-mutual-group collaborative optimization method for information-energy systems[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2019, 2(5): 457-465(in Chinese).
- [57] ANDRAE A. Total consumer power consumption forecast[R]. Helsinki: Nordic Digital Business Summit, 2017.
- [58] 王小元, 赵军, 王永真, 等. 基于CO₂热泵的产消型数据中心能效联动优化[J]. *南方能源建设*, 2020, 7(3): 28-37.
- WANG Xiaoyuan, ZHAO Jun, WANG Yongzhen, et al. Energy efficiency linkage optimization of production and consumption data center based on CO₂ heat pump[J]. *Southern Energy Construction*, 2020, 7(3): 28-37(in Chinese).
- [59] YU J W, JIANG Y Q, YAN Y Q. A simulation study on heat recovery of data center: a case study in Harbin, China[J]. *Renewable Energy*, 2019, 130: 154-173.
- [60] ARLITT M, BASH C, BLAGODUROV S, et al. Towards the design and operation of net-zero energy data centers[C]//13th InterSociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems. May 30 - June 1, 2012, San Diego, CA, USA. IEEE, 2012: 552-561.
- [61] 李浩, 钟声远, 王永真, 等. 基于能量与信息耦合的分布式能源系统配置优化方法[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(17): 5467-5476.
- LI Hao, ZHONG Shengyuan, WANG Yongzhen, et al. Optimization method on the distributed energy system based on energy and information coupled[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(17): 5467-5476(in Chinese).
- [62] 宋杰, 孙宗哲, 刘慧, 等. 混合供电数据中心能耗优化研究进展[J]. *计算机学报*, 2018, 41(12): 2670-2688.
- SONG Jie, SUN Zongzhe, LIU Hui, et al. Research advance on energy consumption optimization of hyper-powered data center[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2018, 41(12): 2670-2688(in Chinese).
- [63] 刘成运, 孟超, 景锐, 等. A级数据中心综合能源系统多目标优化设计和调度[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(14): 136-142.
- LIU Chengyun, MENG Chao, JING Rui, et al. Multi-objective optimization design and scheduling of integrated energy system in A-level data center[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(14): 136-142(in Chinese).
- [64] 程林, 张靖, 黄仁乐, 等. 基于多能互补的综合能源系统

- 多场景规划案例分析[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 282-287.
- CHENG Lin, ZHANG Jing, HUANG Renle, et al. Case analysis of multi-scenario planning based on multi-energy complementation for integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 282-287(in Chinese).
- [65] 刘敦楠, 王佳妮, 华婧雯, 等. 基于模糊Petri网的能源互联网场景特征识别方法[J]. 电网技术, 2020, 44(10): 3725-3734.
- LIU Dunnan, WANG Jiani, HUA Jingwen, et al. Feature identification method of energy Internet scene based on fuzzy Petri net[J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 3725-3734(in Chinese).
- [66] 赵银波, 高红均, 王仲, 等. 考虑用户电能替代的商业园区运营商多能交易博弈优化决策[J]. 电网技术, 2021, 45(4): 1320-1331.
- ZHAO Yinbo, GAO Hongjun, WANG Zhong, et al. Optimal decision of multi-energy trading with game for commercial park operators considering user-side electricity substitution[J]. Power System Technology, 2021, 45(4): 1320-1331(in Chinese).
- [67] 范成围, 陈刚, 熊哲浩, 等. 考虑室内体感舒适度的城市楼宇型能量枢纽优化配置与定容应用分析[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(3): 291-300.
- FAN Chengwei, CHEN Gang, XIONG Zhehao, et al. Optimal configuration and capacity settings for urban building energy hub considering indoor somatosensory comfort[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(3): 291-300(in Chinese).
- [68] 杨锡运, 董德华, 李相俊, 等. 商业园区储能系统削峰填谷的有功功率协调控制策略[J]. 电网技术, 2018, 42(8): 2551-2561.
- YANG Xiyun, DONG Dehua, LI Xiangjun, et al. Active power coordinated control strategy of peak load shifting for energy storage system in business park[J]. Power System Technology, 2018, 42(8): 2551-2561(in Chinese).
- [69] 李天阳, 赵兴旺, 肖文举. 面向峰谷平衡的商业楼宇空调负荷调控技术[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(17): 96-102.
- LI Tianyang, ZHAO Xingwang, XIAO Wenju. Regulation technology of air-conditioning load in commercial buildings for balance of power grid peak and valley[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 96-102(in Chinese).
- [70] 郭尊, 李庚银, 周明, 等. 计及综合需求响应的商业园区能量枢纽优化运行[J]. 电网技术, 2018, 42(8): 2439-2448.
- GUO Zun, LI Gengyin, ZHOU Ming, et al. Optimal operation of energy hub in business park considering integrated demand response[J]. Power System Technology, 2018, 42(8): 2439-2448(in Chinese).
- [71] MAXWELL W H, BUJANOVIC T, GHOSH P K. Evolving the electric utility distribution substation into a microgrid[C]//2017 IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE). August 14-17, 2017, Oshawa, ON, Canada. IEEE, 2017: 148-154.
- [72] LIU C T, HUNG K Y, GALICIA M E, et al. Systematic integration guidance for alleviating substation congestion of steel mill power systems by distributed generation units[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(5): 3113-3119.
- [73] BRENNAN M, DOLARA A, FOIADELLI F, et al. Urban scale photovoltaic charging stations for electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(4): 1234-1241.
- [74] 马会萌, 李相俊, 贾学翠. 多站融合场景下的系统配置及协调运行策略[J]. 电力建设, 2021, 42(1): 96-104.
- MA Huimeng, LI Xiangjun, JIA Xuecui. Capacity configuration and coordinated operation strategy in the multi-station integration scenario[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(1): 96-104(in Chinese).
- [75] ZHANG S J, MA Y W, YANG J S, et al. Comprehensive evaluation method of safety and benefit for multi-station integration[C]//2019 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC). November 21-23, 2019, Beijing, China. IEEE, 2019: 2618-2623.
- [76] 贺鸿杰, 张宁, 杜尔顺, 等. 电网侧大规模电化学储能运行效率及寿命衰减建模方法综述[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(12): 193-207.
- HE Hongjie, ZHANG Ning, DU Ershun, et al. Review on modeling method for operation efficiency and lifespan decay of large-scale electrochemical energy storage on power grid side[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(12): 193-207(in Chinese).
- [77] 陈飞飞, 郑立军, 俞聪. 天然气分布式多联供技术的应用研究[J]. 科技创新与应用, 2019(29): 179-181.
- [78] 郑爱. 智能变电站信息物理系统网络建模分析关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- ZHENG Ai. Research on key technologies of modeling and analysis of smart substation cyber-physical system[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020(in Chinese).
- [79] 陈炯聪. 智能变电站数据信息过程管控方法与融合应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- CHEN Jiongcong. Research on process control method and fusion application of intelligent substation data information[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018(in Chinese).
- [80] 李婧娇. 电力信息-物理融合系统网络安全分析方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2019.
- LI Jingjiao. Research on cybersecurity risk analysis method for power cyber-physical system[D]. Wuhan: Wuhan University, 2019(in Chinese).
- [81] 黄天聪, 邓礼力, 薛武, 等. 输变电设备物联网通信网络结构及拓扑分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(12): 3922-3928.
- HUANG Tiancong, DENG Lili, XUE Wu, et al.

- Communication network structure and topology analysis of Internet of Things for power transmission and transformation equipment[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(12): 3922-3928(in Chinese).
- [82] 陈永波, 汤奕, 艾鑫伟, 等. 基于LPWAN技术的能源电力物联专网[J]. 电信科学, 2017, 33(5): 143-152.
CHEN Yongbo, TANG Yi, AI Xinwei, et al. Electricity Internet of Things based on LPWAN technology[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(5): 143-152(in Chinese).
- [83] 张子仪, 蔡泽祥, 郭采珊, 等. 面向泛在电力物联网的分布式云数据中心优化选址[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 36-42.
ZHANG Ziyi, CAI Zexiang, GUO Caishan, et al. Optimization of distributed cloud computing data center layout for ubiquitous power Internet of Things[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 36-42(in Chinese).
- [84] 张宁, 杨经纬, 王毅, 等. 面向泛在电力物联网的5G通信: 技术原理与典型应用[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(14): 4015-4025.
ZHANG Ning, YANG Jingwei, WANG Yi, et al. 5G communication for the ubiquitous Internet of Things in electricity: technical principles and typical applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(14): 4015-4025(in Chinese).
- [85] 黄开艺, 艾芊, 张宇帆, 等. 基于能源细胞-组织架构的区域能源网需求响应研究挑战与展望[J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3149-3160.
HUANG Kaiyi, AI Qian, ZHANG Yufan, et al. Challenges and prospects of regional energy network demand response based on energy cell-tissue architecture[J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3149-3160(in Chinese).
- [86] 潘虹锦, 高红均, 刘畅, 等. 综合能源服务商-多用户利益共同体协调运营优化策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(9): 3195-3207.
PAN Hongjin, GAO Hongjun, LIU Chang, et al. Research on coordinated operation optimization strategy of integrated energy service provider and multi-users interest community[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(9): 3195-3207(in Chinese).
- [87] 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.
- [88] 顾辰方, 闫文浩, 王赛一. 基于能源互联网架构的综合能源服务业务模式与实施路径研究[J]. 电力与能源, 2019, 40(4): 455-458.
GU Chenfang, LYU Wenhao, WANG Saiyi. Business model and implementation path of integrated energy services based on energy Internet architecture[J]. Power & Energy, 2019, 40(4): 455-458(in Chinese).
- [89] 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(in Chinese).
- [90] 吴建中. 欧洲综合能源系统发展的驱动与现状[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(5): 1-7.
WU Jianzhong. Drivers and state-of-the-art of integrated energy systems in Europe[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(5): 1-7(in Chinese).
- [91] 贾宏杰, 穆云飞, 余晓丹. 对我国综合能源系统发展的思考[J]. 电力建设, 2015, 36(1): 16-25.
JIA Hongjie, MU Yunfei, YU Xiaodan. Thought about the integrated energy system in China[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(1): 16-25(in Chinese).
- [92] 郭创新, 王惠如, 张伊宁, 等. 面向区域能源互联网的“源-网-荷”协同规划综述[J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3071-3080.
GUO Chuangxin, WANG Huiru, ZHANG Yining, et al. Review of “source-grid-load” co-planning orienting to regional energy Internet[J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3071-3080(in Chinese).
- [93] 马润泽. 基于大数据技术的配电网规划研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
MA Runze. Research on distribution network planning based on big data technology[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018(in Chinese).

收稿日期: 2021-04-22; 修回日期: 2021-05-27。

作者简介:



高正平

高正平(1976), 男, 博士, 教授级高级工程师, 从事电力系统规划、物资管理等相关工作, E-mail: gaozp@js.sgcc.com.cn。

刘昊宇(1998), 男, 硕士研究生, 研究方向为综合能源系统, E-mail: liuhaoyu@seu.edu.cn。

李琥(1979), 男, 高级工程师, 从事电力系统规划设计、综合规划、能源电源研究等工作, E-mail: lihu@js.sgcc.com.cn。

刘国静(1988), 男, 高级工程师, 研究方向为电网规划、储能规划、能源经济等, E-mail: liu.guojing@qq.com。

王洪儒(1996), 男, 博士研究生, 研究方向为信息物理系统等, E-mail: wanghongru@seu.edu.cn。

王琦(1989), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为电力信息物理系统、电力系统网络安全等。通信作者, E-mail: wangqi@seu.edu.cn。

汤奕(1977), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统稳定分析与控制、电力信息物理系统等, E-mail: tangyi@seu.edu.cn。

(责任编辑 李锡)