

DOI: 10.3969/j.issn.2097-0706.2022.06.003

# 虚拟电厂基础特征内涵与发展现状概述

Overview on the characteristics, connotation and development status of virtual power plants in China

钟永洁, 纪陵, 李靖霞, 蒋衍君, 吴世伟, 王紫东

ZHONG Yongjie, JI Ling, LI Jingxia, JIANG Yanjun, WU Shiwei, WANG Zidong

(国电南京自动化股份有限公司, 南京 211153)

(Guodian Nanjing Automation Company Limited, Nanjing 211153, China)

**摘要:**在国家“30·60”战略推动下,虚拟电厂成为开展新型电力系统建设、解决能源变革的重要手段,是实现“双碳”目标的一个重要发展方向,为新能源电力的安全高效利用开辟了一条新的路径。首先,对虚拟电厂的内涵概念进行阐述,并在此基础上分析了我国虚拟电厂产生的客观大背景,结合目前我国虚拟电厂的外部政策环境剖析了当前虚拟电厂的主流业务板块;然后,简要介绍了国内外已经开展的虚拟电厂应用案例,进而归纳出虚拟电厂当前和未来快速发展所必须的可控资源、关键技术、市场机制等支撑要素;其次,对虚拟电厂的3个发展阶段进一步阐述,并对我国虚拟电厂发展中的现实问题进行了概况分析;最后,在完成对虚拟电厂基础特征内涵与发展现状概述的基础上对虚拟电厂在未来的发展进行了展望。

**关键词:**虚拟电厂;碳中和;需求响应;能源互联网;可控资源;新型电力系统;综合能源;储能

中图分类号:TK 01:TM 73 文献标志码:A 文章编号:2097-0706(2022)06-0025-12

**Abstract:** To achieve the "30·60" goal, virtual power plants have been taken as an important measure to construct a new power system and complete energy transformation. It is also the development direction for the safe and efficient utilization of new energy. The connotation and overall characteristics of virtual power plants are introduced. And against the backdrop of the status quo in China, the main business segments of a virtual power plant and its political environment are expounded. Given the existing cases home and abroad, the supporting elements including controllable resources, key technologies and market mechanism for the rapid development of virtual power plants are summarized. Then, the problems in the promotion of virtual power plants in China are summarized based on the three development phases. Based on the understanding on the connotation and basic characteristics, it is believed that virtual power plants are promising in integrated application with digitalization, intelligentization, cloud sharing, artificial intelligence, big data, Internet of Things and other technologies.

**Keywords:** virtual power plant; carbon neutrality; demand response; Energy Internet; controllable resources; new power system; integrated energy; energy storage

## 0 引言

在碳中和、碳达峰背景和目标的驱动下,我国大力推动能源绿色转型,以坚强智能电网为枢纽平台<sup>[1-4]</sup>,以源、网、荷、储互动与多能互补集成为支撑<sup>[1-3,5-7]</sup>,集中式发电与分布式发电结构并举<sup>[1,3-5]</sup>,构建以新能源为主体的更加清洁低碳、安全可控、灵活高效、智能友好、开放互动的新型电力系统<sup>[2-3,6-9]</sup>。

然而,我国电力行业正处于新老电力系统的转

型期,市场主体将从单一化向多元化转变,电力输送将从传统的“发、输、配、用”向新型的“源、网、荷、储”转变<sup>[3-4,7-10]</sup>。尤其是碳达峰、碳中和目标确立后,分布式能源和分布式储能的加入,让原有的电力系统变得更加复杂<sup>[4,6,9-12]</sup>。与此同时,新能源装机比例及用户侧间歇性负荷的进一步增长,对电力系统灵活调节能力提出了越来越高的要求,传统“源随荷动”的运行模式亟须向“源荷互动”转变<sup>[5-7,13-16]</sup>。随着碳中和、碳达峰目标的持续推进,可再生能源、分布式发电的开发得到前所未有的重视,新能源发电大规模布局逐渐成为新业态<sup>[2-5,11,16-20]</sup>。挖掘负荷侧的灵活性资源和调节潜力,成为提升电力系统调节能力和保障电力供应的

重要手段<sup>[6-9,16,21-24]</sup>。

新型电力系统的发展成为未来趋势,在新的发电、输电、配电、用电新态势下,“虚拟电厂”应运而生,虚拟电厂是当前国家开展新型电力系统建设,实现碳达峰、碳中和目标的一个重要建设方向<sup>[5-9,18,24-28]</sup>,虚拟电厂在破解清洁能源消纳难题、绿色能源转型方面将发挥重要作用,它能够提升能源服务,实现对分布式能源的响应分配、灵活潜力挖掘、多元负荷预测、实时协调控制,参与电力交易市场和需求响应<sup>[8,12,29-32]</sup>。虚拟电厂作为新型电力系统转型中的重要配置,在政策扶持、技术验证、商业模式等方面都日趋成熟<sup>[14,26,33-37]</sup>。可以预见,虚拟电厂将成为未来解决能源变革问题的重要手段,即将迈入快速增长期<sup>[15,29,38-42]</sup>。

目前,国内外学者在虚拟电厂的结构特征、运行机制、优化调度、发展应用等方面已经有了一些基础性研究。文献[2]阐述了虚拟电厂的基础概念与实现架构,并从电动汽车、综合能源、可再生能源3个视角介绍了虚拟电厂优化调度相关的关键技术。文献[5]分析了虚拟电厂在协调控制、优化调度、参与电力市场交易3个方面的研究现状。文献[10]建立了基于多代理系统的虚拟电厂控制架构,并提出了多虚拟电厂参与电力市场时的双层协调运行机制。文献[22]从聚合、经济、运营3个维度研究了虚拟电厂协调优化机理,并对虚拟电厂未来发展进行了合理展望。文献[24]提出了一个数据挖掘驱动的基于激励需求响应方案来模拟虚拟电厂及其参与者之间的电力交易,方案通过提供激励来诱导消费者减少负荷并使分布式能源资源得到最大利用。文献[29]对上海电力市场现状进行了研究,并以虚拟电厂为主体建立了其运营市场体系。文献[38]根据虚拟电厂的组成单元特征构建虚拟电厂源、荷、储多元备用容量体系。综合以上分析,已有研究相对缺乏从不同视角对虚拟电厂基础特征内涵的深度剖析及其发展现状的综合概述研究,亟须进一步开展相关方面研究分析。

基于此,文中接下来将对虚拟电厂的基础内涵、概念、特征开展简要的阐述,并对我国虚拟电厂产生、发展背景及外部政策环境的支撑情况进行分析。进一步介绍当前虚拟电厂的主流业务板块,并结合虚拟电厂应用案例进行分析,进而概括出虚拟电厂发展中所必需的几个支撑要素。阐述虚拟电厂的3个发展阶段,并对我国虚拟电厂发展中的现实问题进行了概况分析。最后对虚拟电厂在未来的发展进行合理展望。

## 1 虚拟电厂概念特征

### 1.1 虚拟电厂概念

虚拟电厂其实不是一个新概念或新事物,它的提出已有20余年。21世纪初在德国、英国、法国、荷兰等欧洲国家兴起,并已拥有多个成熟的示范项目,其主要关注分布式能源的可靠并网,同时构筑电力市场中稳定的商业模式<sup>[9-11,32-35]</sup>。近年来,我国虚拟电厂发展受到越来越多的关注和重视,且在目前邀约阶段开展了一定程度上的示范实践,缘由是我国电力系统和政策市场在发生变化,逐渐满足了虚拟电厂诞生、发展的基础土壤环境<sup>[1-3,27,36-37]</sup>。

虚拟电厂顾名思义就是虚拟化的电厂,其结构示意如图1所示。它不是一个真实的物理电厂,但起到了电厂的作用:发出电能,参与能量市场;通过调节功率来参与辅助服务市场调峰、调频等<sup>[14,38-41]</sup>。虚拟电厂内部通过信息技术将发电、用电、储能等资源进行梳理聚合,与外部集控系统、管理平台配合进行协同控制、协同优化,实现数据分析、运行策略调整<sup>[26-28,39-41]</sup>。虚拟电厂对外进行能量传输,根据市场变化需求进行碳市场、电力市场交易。因此,可以将虚拟电厂理解为一种能发挥电厂作用的某种“黑匣子”,它不需要新建一个电厂,但是对外既可以作为“正电厂”向系统供电,也可以作为“负电厂”接收系统的电力。“黑匣子”包含分布式电源、多元储能设施、电动汽车、可控负荷等资源<sup>[1-3,18,26-29]</sup>。但只有这些资源还不足以使之成为有效的能源系统,虚拟电厂还需要一套技术和系统来将它们智能的聚合起来。

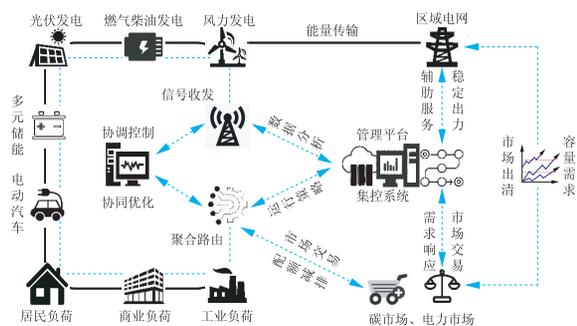


图1 虚拟电厂结构示意图

Fig. 1 Schematic structure of a virtual power plant

虚拟电厂是一种通过先进信息通信技术和软件系统,实现分布式电源、储能系统、可控负荷、微网、电动汽车等分布式能源资源的聚合和协调协同优化,以作为一个特殊电厂参与电力市场和电网运行的电源协调管理系统<sup>[11-14,28,35-38]</sup>。虚拟电厂通过分布式能源管理系统将分散安装的清洁能源、可控

负荷和储能聚合作为一个特别的电厂参与电网运行。汇聚的资源可以是发电侧的正电厂,也可以是用户侧的负电厂,还可以是发电用电都有的综合电厂,其核心思想就是把各类分散可调电源、可控负荷、储能聚合起来,通过数字化的手段形成一个虚拟的电厂来做统一的管理和调度,同时作为聚合主体参与电力市场<sup>[14,39-41]</sup>。所以,虚拟电厂本质上是一套软件平台系统,它聚合了现有的分布式资源,并通过协同控制,参与电力市场,从而替代新建真实的物理电厂<sup>[6,17,40]</sup>。

虚拟电厂是对大规模新能源电力进行安全高效利用的有效形式。以风能和太阳能为代表的新能源具有显著的间歇性和强随机波动性,以此为一次能源的发电方式不仅会将这些特性继承下来,还会随时空范围的变化产生规律性改变<sup>[15-21]</sup>。因此,若将单一形式的多台新能源发电机组规模化地接入大电网,将产生较严重的系统稳定性问题,这将是制约新能源电力大规模开发利用的瓶颈<sup>[3,22,29-32]</sup>。虚拟电厂提供的新能源电力与传统能源和储能装置集成的模式,能够在智能协同调控和决策支持下对大电网呈现出稳定的电力输出特性,为新能源电力的安全高效利用开辟了一条新的路径<sup>[19,26-29,38]</sup>。

## 1.2 虚拟电厂特征

简单来看,虚拟电厂和需求侧响应比较相似,本质内涵也比较一致,尤其是虚拟电厂参与日前邀约需求响应实现削峰的目的时,表面特征比较类似<sup>[21,30,39-40]</sup>。实际上,广义来讲,虚拟电厂是需求侧响应的延伸版,需求侧响应主要是削峰,主要针对用户负荷;虚拟电厂则是削峰和填谷兼顾,部分具有储能特征,源、网、荷、储都包含在内<sup>[2-5,36,39-41]</sup>。与需求响应的调节方式相比,虚拟电厂由于接入了更多元化的用户,如储能、分布式发电、可控负荷等,在用户参与调节时,不仅负荷侧的用户可以调节自身用电增减,还可以召集储能侧、电源侧的用户调节电能输出,具有丰富的调节方式和手段<sup>[35,40]</sup>。

从“黑匣子”视角来看,虚拟电厂由于聚集了分布式能源(发电)、储能(充电/放电)、可控负荷(用电)等,因此可根据实际的组成将其划分为电源型、负荷型、储能型、混合型4类,具体特征如图2所示。

虚拟电厂由可控机组、不可控机组,如风、光等分布式能源、储能、可控负荷、电动汽车、通信设备等聚合而成,并进一步考虑需求响应、不确定性等要素,通过与控制中心、云中心、电力交易中心等进行信息通信,实现与大电网的能量互换<sup>[19-23,39-40]</sup>。在更广义的概念中,虚拟电厂是基于互联网的能源高

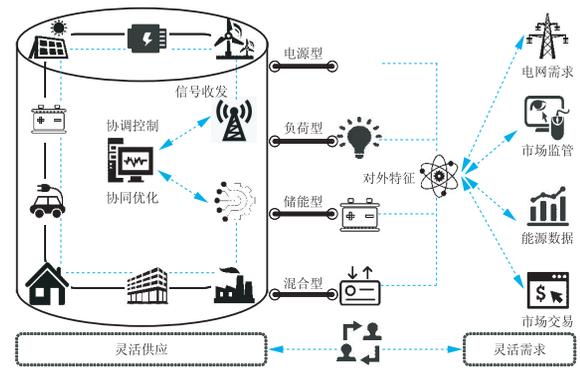


图2 虚拟电厂对外特征示意

Fig. 2 Characteristics of different virtual power plants

度聚合,以及以此为基础而拓展出的多样化衍生服务,其核心是“聚合”和“通信”。将资源进行聚合,并将接入的资源参与到电网互动中,互动内容包括需求响应、辅助服务、电力现货交易等,优化电网的运行状态与电力市场的广泛参与,是虚拟电厂近期和远期所能提供的主要服务<sup>[26-29,33-36]</sup>。根据虚拟电厂对外特征,不同类型特征的虚拟电厂具有不同的服务能力。

(1)电源型虚拟电厂:具有能量出售的能力,可以参与能量市场,并视实际情形参与辅助服务市场。

(2)负荷型虚拟电厂:具有功率调节能力,可以参与辅助服务市场,能量出售属性不足。

(3)储能型虚拟电厂:可参与辅助服务市场,也可以部分时段通过放电来出售电能。

(4)混合型虚拟电厂:全能型角色。在国外案例中,各国各有特点,日本和德国以储能和分布式电源作为虚拟电厂的主体,美国则是以可控负荷为主,规模已占尖峰负荷的5%以上<sup>[18,36-38,40]</sup>。

根据上述可知,虚拟电厂就是虚拟化的发电厂,它并不具备实体发电厂物理属性,而是一种管理模式或者说是一套系统,通过配套的技术把分散在不同空间的小型太阳能、风能等新能源发电装置、储能电池和各类可控制、可调节的用电设备、负荷整合集成,协调控制,对外等效形成一个可控电源,辅助电力系统运行,并可参与电力市场交易,同时优化资源利用,维护区域内,甚至跨区域的用电稳定与用电安全<sup>[20,26,33-36]</sup>。它既可以有计划地接收电力系统的电力,又可以向电力系统反向输出电力,更灵活高效地进行“削峰填谷”等作业,并获得可观的经济收益<sup>[7,18,40-42]</sup>。

## 2 虚拟电厂产生背景

目前,我国电力系统主要是以火力发电为主,水电、风电、光伏发电、核电等发电形式作为补充的

电力能源系统<sup>[6,15-17,38]</sup>。传统电力能源生态系统和虚拟电厂能源生态系统示意如图 3 所示。传统电力能源生态系统总体上围绕电力的生产和消耗,大体上可分为发电侧、输配侧、用电侧;传统电力能源生态系统发电、输电、配电、用电界限较为清晰,生产者与消费者关系也是相对明确,能源系统为典型的“源随荷动”运行模式<sup>[2-5,19,35]</sup>。

相对于传统电力能源生态系统,虚拟电厂的能源生态系统出现了明显变化,发电、输电、配电、用

电界限相互交叉,同时兼具生产者与消费者的角色,根据需求可以改变角色身份特征,运行方式特征为“源荷互动”<sup>[6-8,17,40]</sup>。虚拟电厂系统和服务平台将发、输、配、用电综合聚合一起,内部的每一部分都是一个小能源系统,虚拟电厂丰富了智能电网的内涵,也扩展了智能电网的外延,为保证安全、可靠、优质、高效的电力供应,满足经济社会发展对电力的多样化需求,解决能源与环保问题提供了可行的解决方案。

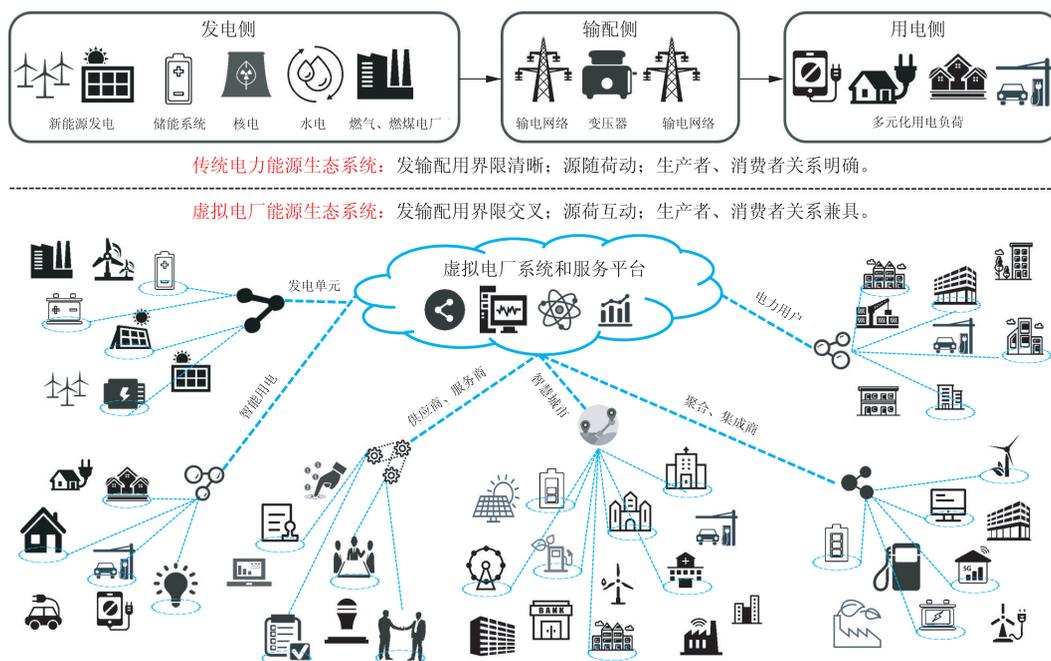


图 3 传统电力能源生态系统和虚拟电厂能源生态系统示意

Fig. 3 External environment of a traditional power plant and a virtual power plant

电网对运行安全有着严格要求,而电网安全的首要目标就是保证发用电的实时平衡,需要发电侧的不断调节去拟合负荷曲线。但是,新能源发电严重依赖于光照强度、风力强度等自然资源特性指标,具有随机性、间歇性和波动性的特点,对负荷的支撑能力不足<sup>[11,36-37,40-41]</sup>。

若规模化直接并入电网发电,将会对电网造成巨大冲击,威胁电力系统安全以及供电的稳定性。另外,由于小型分布式新能源发电设施、储能设施、可控制用电设备、电动汽车等的持续发展普及,在用电侧,很多电力用户也从单一的消费者转变为混合形态的产销者<sup>[3-6,28,33]</sup>,并且各类激增的大功率用电设备,如充电桩所消耗的电也让电网供应尖峰负荷时压力倍增,显然不能任由尖峰负荷“一哄而上”。因而,新的发用电势态下,“虚拟电厂”应运而生,为电力能源的安全高效利用开辟了一条新的路径<sup>[18-22,37]</sup>。

随着分布式能源发电技术的逐步成熟与推广,

越来越多的分布式能源被广泛运用于电力系统用户侧,作为配网中不可或缺清洁能源,分布式能源的加入既有效降低了用户侧的碳排放水平又缓解了电力供需间的不平衡现象。另外,如何实现“源、网、荷、储”电力电量平衡、储能管理、策略运营和优化协调运行等功能成了未来价值投资的关键技术,而虚拟电厂作为分布式能源管理的重要技术手段在工业界和学术界都得到了广泛的研究和运用,其以技术可行、经济合理、互利共赢的模式实现低碳、经济转型,助力实现可持续发展、推动碳达峰、碳中和目标的实施<sup>[15,26,34-36]</sup>。

### 3 虚拟电厂政策环境

2021年,中央深改委通过了《关于加快建设全国统一电力市场体系的指导意见》,电力市场改革再提速,虚拟电厂作为市场主体,通过参与市场交易完成商业活动,获得经济收益<sup>[15-19,39-42]</sup>。

2022年,国家发展改革委和国家能源局发布的

《“十四五”现代能源体系规划》中提出,大力推进电源侧储能发展,合理配置储能规模,改善新能源场站出力特性,支持分布式新能源合理配置储能系统,开展工业可调节负荷、楼宇空调负荷、大数据中心负荷、用户侧储能、电动汽车与电网能量互动等各类资源聚合的虚拟电厂示范。

2022年,国家能源局南方监管局发布了《2022年南方区域电力市场监管工作要点》,组织修订南方区域“两个细则”,推动储能、虚拟电厂等更多市场主体纳入“两个细则”考核补偿管理,研究增加转动惯量、爬坡等新的辅助服务品种。组织调度机构制定新型储能、虚拟电厂等第三方的主体并网调度运行规程、规范和标准。

2022年广东省能源局和国家能源局南方监管局发布了《广东省市场化需求响应实施细则(试行)》,建立以市场为主的需求响应补偿机制,引入有资源聚合管理能力的负荷聚合商,拓宽电力需求响应实施范围,挖掘传统高载能工业负荷、工商业可中断负荷、用户侧储能、电动汽车充电设施、分布式发电、智慧用电设施等各类需求侧资源并组织其参与需求响应,逐步形成年度最大用电负荷5%的响应能力,发挥需求侧资源削峰填谷、促进电力供需平衡和适应新能源电力运行的作用,助力能源消费向绿色低碳转型。

国家碳达峰、碳中和“1+N”政策体系相关文件,以及《“十四五”现代能源体系规划》均提出对电力需求侧响应能力的要求。无论从政策规范、技术标准还是市场机制,这些政策的相继出台都将推动虚拟电厂发展提到了重要位置<sup>[16,25,34-37]</sup>。

## 4 虚拟电厂业务板块

总体来看,虚拟电厂的业务板块主要体现在以下3个方面<sup>[24,36,40-42]</sup>。

### 4.1 “注源控流”业务板块

为电力系统注入新的电力来源。使得更多的分布式发电有组织、有规律地接入系统和服务平台,进行统一协调运维管理,形成一定规模合力,相对可调可控,最终实现并入电网运行。与此同时,控制调节负荷侧的电力流向及流量。尽可能多地接入可调节用电负荷,使其有序、有规律地按计划用电,并提升综合能效管理,在最大限度地不影响生产生活用电的情况下,综合考虑外部电网供电情况、内部自发电情况、各类用电成本、电网需求侧智能管控等因素,科学合理并按最优经济性安排用电计划。

### 4.2 “电力储备”业务板块

多元化储能是实现“注源控流”的关键支撑。对分散的分布式小型新能源发电进行聚合,实现“小溪入大河、大河入大海”,实现聚合多元化资源更有力量、更易调控、更具操作空间。同时,聚合资源统一服从上级调令在聚合资源圈内配套需要的储能系统。对于“控流业务”同样需要配置配套的储能系统才能更灵活、便捷地制定最佳用电方案。简而言之,一个可靠、稳定的虚拟电厂离不开一套高效稳定的储能系统。

### 4.3 商业业务板块

虚拟电厂在聚合多类资源后,最终要参与到电力市场中来才能获得收益。商业业务模式主要有2种:其一,电力交易虚拟电厂可作为售电企业与用户直接交易,或从火电厂购买发电权;其二,辅助服务市场虚拟电厂通过负荷低谷时减少出力或增加负荷、在负荷高峰时增加出力或削减负荷来参与调峰服务交易,以及类似参与调频等服务市场。

## 5 虚拟电厂应用案例

20世纪90年代以来,虚拟电厂受到北美、欧洲多个国家和地区的广泛关注<sup>[4,18,24]</sup>。欧洲各国虚拟电厂侧重于分布式电源和储能资源,主要考虑实现分布式发电的可靠并网、智能互动和参与电力市场,打造持续稳定发展的商业模式;北美地区则基于需求响应发展演化,兼顾可再生能源的利用,希望通过自主需求响应和能效管理来提高综合能源的利用效率,因此可控负荷占主体<sup>[1,24-25,30]</sup>。我国秉承“兼容并包、博采众长”的优良传统,同时吸收2种技术和模式,两手都抓。这一定程度上也是我们的后发优势。聚焦国内市场,自2019年开始,陆续有虚拟电厂的示范项目落地,在经济效益和社会效益两方面都卓有成效<sup>[3-4,18,28]</sup>。

### 5.1 德国Next Kraftwerke公司虚拟电厂

Next Kraftwerke是德国一家大型的虚拟电厂运营商,同时也是欧洲电力交易市场认证的能源交易商,参与能源的现货市场交易。除了虚拟电厂相关的一切业务,从技术、电力交易、电力销售、用户结算等,同时也可以为其他能源运营商提供虚拟电厂的运营服务<sup>[12-15,28,40-42]</sup>。截至2018年,Next Kraftwerke管理了超过6854个客户资产(如分布式发电设备和储能设备),包括生物质发电装置、热电联产、水电站、灵活可控负荷、风能和太阳能光伏电站等,容量超过5987MW。Next Kraftwerke管理的单个客户资源平均只有0.87MW,单个资源规模偏小且零散,调度和交易难度大、成本高,很难通过市

场交易获利<sup>[6-8,17,39-41]</sup>。

Next Kraftwerke 公司通过其高超的资源聚合能力和创新的商业模式,创造了惊人的发展速度和优异的经营业绩。2009 年才成立的 Next Kraftwerke 公司目前员工总数 149 人,实现销售收入 3.82 亿欧元,人均 256 万欧元,交易电量 140 GW·h。其主要盈利模式有 3 个。模式 1:将风电、光伏等零或低边际成本的发电资源参与电力市场交易。模式 2:利用每次 15 min,每天 96 次的电力市场价格波动,虚拟电厂调节分布式电源的出力、需求响应,实现低谷用电、高峰售电,获取最大经济利润。模式 3:利用微燃机、生物质发电等启动速度快、出力灵活的特点,参与电网的辅助服务,获取收益。

盈利途径背后是 Next Kraftwerke 的资源聚合能力,不同的客户资源各有其特点,虚拟电厂通过市场、技术手段并用,查缺补漏、优势互补,既包含“量”的整合,更具有“质”的提升,实现了分布式资源拥有方、虚拟电厂运营方,甚至电网方的各方利益共赢。比如,风电、光伏等可再生能源,由于采用逆变器输出形式,缺乏足够的惯量,具有间歇性的固有属性,呈现出波动、不可控的外部特性。尽管发电边际成本低,但单独参与电能量市场,尤其是合约市场,存在一定的难度。分布式燃机、生物质等同步发电机输出形式的发电资源,与大电网友好、兼容,具有灵活、可调的优势。但与大机组相比,边际成本偏高,在电力市场中“先天不足”。虚拟电厂可以实现 2 种发电资源的整合,扬长避短,能以较大的竞争优势参与电力市场,获取最大收益。再比如,虚拟电厂通过聚合资源,量变上升为质变,以聚合后资源参与电能量市场和辅助服务市场,提高议价能力,在获取最大收益的同时为电网安全稳定运行贡献力量。

## 5.2 上海黄浦区虚拟电厂项目

2021 年,国家电网在上海黄浦区开展了国内首次基于虚拟电厂技术的电力需求响应行动,迄今最大规模的一次试运行,参与楼宇超过 50 栋,释放负荷约 10 MW,仅仅 1 h 的测试,就能产生 150 MW·h 的电量。在这次测试中,累计调节电网负荷 562 MW·h,消纳清洁能源电量 1 236 MW·h,减少碳排放量约 336 t。实现途径为:在用电高峰时段,系统对虚拟电厂区域内,相关建筑中央空调的温度、风量、转速等多个特征参数,进行自动调节,且对用户体感影响不大。技术层面是有一些工作量的,包括控制、计量、调度、交易等,以往的能源调控颗粒度比较大,虚拟电厂针对的是设备级,而且要求自动响应的話,复杂程度就很高了。以上海项目为例,

还是在系统平台上,负荷集成商进行竞价。三级的架构,即平台、负荷集成商、用户。补贴价格根据响应时间,也有区分。用户在 30 min 之内进行削峰,补贴是基准价格的 3 倍,30 min 到 2 h 之间是基准价格的 2 倍,时间更长补贴就更低。补贴的来源目前主要是各省的跨省区可再生能源电力现货交易购电差价的盈余部分,所以还是有一些制约,很多省份还没有开始现货交易。

## 5.3 南方电网深圳虚拟电厂实践项目

2021 年,由南方电网深圳供电局、南方电网科学研究院联合研发,国内首个“网地一体虚拟电厂运营管理平台”在深圳试运行。该平台部署于南方电网调度云,网省两级均可直接调度,为传统“源随荷动”调度模式转变为“源荷互动”新模式提供了解决方案。深圳供电局通过该平台向 10 余家用户发起电网调峰需求,深圳能源售电公司代理的深圳地铁集团站点、深圳水务集团笔架山水厂参与响应。随后,深圳地铁集团站点、深圳水务集团笔架山水厂在保证正常安全生产的基础前提下,按照计划精准调节用电负荷共计 3 MW,相当于 2 000 户家庭的空调用电负荷量。

## 5.4 国家电网冀北虚拟电厂示范项目

2019 年年底,国家电网冀北虚拟电厂示范项目投运。公开数据显示,到 2020 年,冀北电网夏季空调负荷将达 6 GW,10% 空调负荷通过虚拟电厂进行实时响应,相当于少建一座 600 MW 的传统电厂。“煤改电”最大负荷将达 2 GW,蓄热式电采暖负荷通过虚拟电厂进行实时响应,预计可增发清洁能源 720 GW·h,减排 63.65 万 t 二氧化碳。

## 6 虚拟电厂发展支撑要素

在碳中和、碳达峰的背景下,新型电力系统的发展成为未来趋势,如何消纳广泛的清洁能源成为技术创新和商业模式的重点<sup>[3-5,8-11,28,31]</sup>。抛开市场环境做业务步履维艰,虚拟电厂能够从设计到成功落地,离不开可控资源、关键技术和电力市场机制的合力支撑<sup>[6-8,11,26-28,34]</sup>。

### 6.1 可控资源

虚拟电厂的自动化调度属性决定了需要聚合可控资源作为基础,其中包括发电侧的可调节发电资源和用户侧的可控负荷资源,以及参与到整体协同效应的各类型调度资源。整体虚拟电厂的业务是以可控资源为核心池,涵盖融合其他资源,如光伏风能、抽水蓄能、充电桩、电动汽车、微电网、家庭用能等<sup>[5-8,39-41]</sup>。

### 6.2 关键技术

基于虚拟电厂的需求侧响应、调频服务、电力辅助服务、电力市场交易、偏差考核补偿服务、能效管理等业务场景。做到分钟级、秒级响应是虚拟电厂发展的必然趋势和要求,即虚拟电厂控制的实时性、可靠性以及交易性。通常涉及以下几个方面的关键技术<sup>[2-4,18,29,39-41]</sup>。

#### 6.2.1 实时快速响应的协调控制技术

在虚拟电厂控制各种分布式能源发电设备、储能系统以及可控负荷的过程中,对他们的协调控制是关键的部分,其控制方式又分为集中控制方式、分散控制方式和完全分散控制方式,从而参与多种电力市场的运营模式及调度框架,对发电资源的广泛优化配置起到积极的促进作用<sup>[6-8,39-41]</sup>。同时因为电力的稳定依赖于发电侧和用户侧的供需实时平衡,虚拟电厂再响应电网调控时需要确保偏差准确,实现精准的需求侧响应以及调频服务等。而虚拟电厂聚合各类可控负荷、分布式发电资源种类繁多、数量巨大,需要对每个分布式资源进行快速响应的实时协调控制。可以说虚拟电厂是物联网技术在高灵敏实时响应方向的应用领域之一<sup>[8,12-14,40-42]</sup>。

#### 6.2.2 高效的智慧管控平台

虚拟电厂平台主要可分为资源中心、控制中心、能量管理中心、计算中心和交易中心等,虚拟电厂平台架构如图4所示。资源中心负责对用户和资源的管理。控制中心完成对资源的控制<sup>[5-8,32,36]</sup>。能量管理中心实现基于资源状态和市场信息的资源监视和控制策略制定。计算中心完成对资源的可调度潜力分析等分析计算功能。交易中心负责虚拟电厂与电力交易中心以及虚拟电厂与资源用户的交易管理,竞价策略制定和申报等功能。

虚拟电厂总体技术路线包括1个平台、2张网络、4大中心和多方应用。1个平台即虚拟电厂智慧管控平台,基于云平台部署。4大中心包括资源管理中心、计算分析中心、运行控制中心和交易中心,根据业务分类,基于“微应用”服务架构的多方应用分别部署于各中心,支持应用弹性伸缩即快速部署和快速下线。平台基于电力物联网可接入风力发电、光伏发电、柴油发电、燃气发电,储能灯分布式电源和电动汽车等负荷,同时基于平台的运行控制中心,可控制电力能量的合理流动。同时,平台支持和调度中心、电力市场交易管理中心进行信息交互<sup>[3-6,28-30,37]</sup>。

虚拟电厂智慧运营系统基于基础平台,在安全 I 区、安全 IV 区建设虚拟电厂智慧运营系统相关应

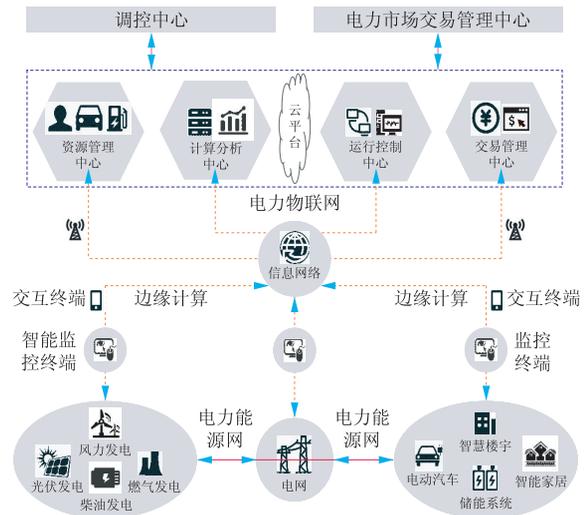


图 4 虚拟电厂平台架构示意

Fig. 4 Schematic architecture of a virtual power plant platform

用功能所示。根据网络安全要求,在安全 I 区、安全 IV 区之间配置正反向物理隔离。虚拟电厂智慧运营系统提供统一的基础支撑平台和“资源管理”“设备管理”“运行监视”“协同控制”“运营管理”“交易管理”“综合评估”“网络安全”等 8 大功能模块。各功能应用模块基于基础平台提供的服务总线、消息总线等公共服务实现各应用功能之间的信息交互。虚拟电厂智慧运营系统结构如图 5 所示。

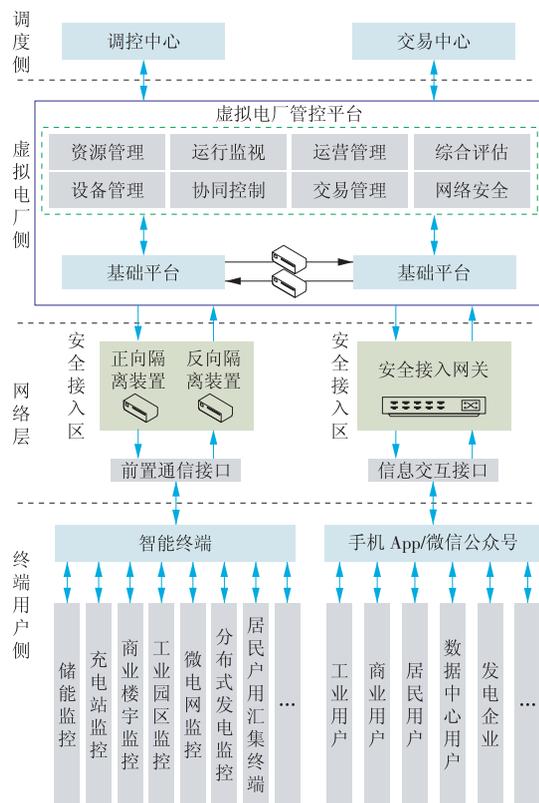


图 5 虚拟电厂运营管控系统逻辑结构示意图

Fig. 5 Logical structure of the operation control system of a virtual power plant

虚拟电厂智慧运营管控系统对上提供与调控中心和电力市场交易中心的接口,接受调度的控制指令,下发资源执行,同时与电力交易中心通信,交互电力市场信息,包括需求侧响应相关信息,参与电力市场,获取经济收益。

虚拟电厂平台管理的资源数量多,地理位置分散,虚拟电厂智慧运营系统对下支持通过无线公网、专网或光纤通道等多种方式实现与各类型资源站端的智能终端实现信息交互,并经过安全接入区接入系统平台。支持通过微信公众号、手机 App 等方式,实现用户注册、资源注册、电价发布、申报竞价、合同签订、状态查询等信息的智慧交互。

### 6.2.3 先进的人工智能和大数据技术

虚拟电厂需要将分布式能源聚合为可控的负荷资源,然后通过虚拟电厂调配电力资源。参与电力现货交易市场和辅助服务市场,实现资源最大化价值利用离不开先进的人工智能和大数据技术<sup>[6-9,18,39-41]</sup>。虚拟电厂运行会不断产生能源和交易数据,人工智能和大数据技术能够帮助虚拟电厂存储和处理海量的电力数据,分析、预测电力负荷和调节、调控的负荷,高效完成响应分配。作为“正电厂”向电网供电削峰,也可作为“负电厂”消纳电力填谷,在收到电力调度中心的指令后快速下发给用户,实现高效的电力调配<sup>[8,21,40-42]</sup>。

### 6.3 市场机制

市场机制关乎虚拟电厂的生存与发展,政府部门和市场主体对虚拟电厂体系和商业模式进行了积极的探索,推进虚拟电厂参与电力辅助服务。培育出适宜的市场环境,让人局企业打造良性的商业模式,有自我造血能力,获得较好的收益,才能推动行业良性发展、产业持续进步<sup>[37-39]</sup>。从虚拟电厂本身的经济效益来看,能够为能源投资者提供高回报、高收益。通过虚拟电厂,不仅能够节省大量投入,而且能够有效应对拉闸限电、综合能效双控等管控,有利于新型电力系统建设,有利于提升经济效益和社会效益<sup>[19,27,39-41]</sup>。

在不同的电力市场机制下,虚拟电厂的自主调度应用场景略有不同。在未来随着中国电力市场的逐步开放,调频服务、发电偏差考核、电力交易均会被纳入到虚拟电厂的业务之中。

## 7 虚拟电厂发展阶段

依据外围条件的不同和市场发展规律,虚拟电厂的发展阶段通常可分为邀约型阶段、市场化阶段、自主调度型阶段<sup>[2-3,11,40-43]</sup>。

### 7.1 邀约型阶段

第1阶段我们称之为邀约型阶段。这是在没有电力市场的情况下,由政府部门或调度机构牵头组织,通过政府部门或电力调度机构发出邀约信号,各个聚合商、虚拟电厂参与组织资源以可控负荷为主进行响应,共同完成邀约、响应和激励流程。

我国虚拟电厂主要处于邀约型阶段,在邀约阶段主要通过政府机构或电力调度机构发出邀约信号,由负荷聚合商、虚拟电厂组织资源进行削峰、填谷等需求响应。当前我国以广东、江苏、上海等省市为代表的试点项目就是以邀约型为主,业务上称之为需求响应。广东省有较好的电力市场环境,该省发布了具体实施方案,按照需求响应优先、有序用电保底的原则,进一步探索市场化需求响应竞价模式,以日前邀约型需求响应起步,逐步开展需求响应资源常态参与现货电能市场交易和深度调峰,有力促进源、网、荷、储友好互动,提升电力系统的调节能力,推动能源消费的高质量发展。

### 7.2 市场化阶段

第2阶段是市场化阶段。这是在电能量现货市场、辅助服务市场和容量市场建成后或已建设成熟,虚拟电厂聚合商以类似于实体电厂的模式,基于自身商业模式分别参与这些市场获得收益。在第2阶段也会同时存在邀约型模式,其邀约发出的主体是系统运行机构。如欧洲的 Next Kraftwerke 公司运营的虚拟电厂。

### 7.3 自主调度型阶段

第3阶段是(跨空间)自主调度型阶段。随着可聚合的资源种类越来越多、数量越来越大、空间越来越广,实际上可称之为“虚拟综合电力系统”,既包含分散各地的分布式能源、储能系统和可控负荷等基础资源,也囊括由这些基础资源进一步组合而成的微网、主动配电网、多能互补多能源系统、局域能源互联网等。可以灵活制定运行策略,或参与能够跨区域的电力市场交易获得利润分成,或参与需求响应、二次调频等电力辅助获取补偿收益,并可使内部的能效管理更具操作性,实现发用电方案的持续优化。

## 8 虚拟电厂现实问题

虚拟电厂的发展除了自身能力要充足之外,还需要考虑外部大环境<sup>[1-4,25-27,39-43]</sup>。

### 8.1 盈利模式

跨省区可再生能源现货交易购电差价盈余作为资金池,只是当前的权宜之计,亟须形成商业模式,而不是长期处于被动的补贴模式:虚拟电厂使

得电网、电厂投资减少了,就去找他们出钱。这种模式很难推广,不好核定,没有企业或个体愿意出钱,需要形成市场化行为,电力市场里面有主体愿意买单,自然不愁主体主动去做。

## 8.2 场景延伸

例如充电桩这样的元素,能否充分融合进来,充电桩可调节性能很强,对时间和舒适度要求不高,发展体量很大,需要统筹规划。

现在很多案例,都是以空调负荷为主,受到很多制约,单个楼宇空调需求响应项目改造投资较大,但可调负荷有限,性价比不高,难以回收投资。

## 8.3 成本问题

目前虚拟电厂平台、终端成本还是很高的,自控、信息设备都很花钱,如何优化成本,对于案例的市场化复制,也是至关重要的。

## 9 总结与展望

本文从虚拟电厂的内涵概念和总体特征2个方面对虚拟电厂进行了总体概述。

(1)虚拟电厂概念是电厂概念的衍生,运用了信息技术和软件技术,综合了需求响应、电力市场、能源调度等机制,能源高度聚合且具有多场景、多样化服务能力新型能源生态系统。

(2)虚拟电厂能源生态系统是在传统电力能源生态系统基础背景下产生的。

(3)辅加国内的有利政策环境的不断出台支持,虚拟电厂的主流业务板块也应运出现。

(4)良好的发展基础背景,有利的外部政策环境,加上逐渐成熟的业务板块成功引导了一批示范实践项目的顺利开展。

(5)虚拟电厂的稳定发展及应用离不开可控资源、关键技术、市场机制等发展支撑要素保驾护航。

(6)虚拟电厂的发展轨迹为从邀约阶段开始,经市场化阶段过渡,最终达到自主调度型阶段。

(7)虚拟电厂的发展除了自身能力要充足之外,还亟须解决现实发展中的盈利模式、场景延伸、成本等问题,现实问题的有效解决,将进一步推动虚拟电厂的快速发展。

在深化电力体制改革背景下,能源转型催生“源荷互动”“源、网、荷、储协同”的需求和更加数字化、智能化的电力系统,而虚拟电厂作为协调分布式资源参与电力交易市场和需求响应的能源数字化平台,在产业政策和市场需求不断加码的现期,可以预期,将迎来快速发展。

在“双碳”目标的确定性远景之下,虚拟电厂具有多样性、协同性、灵活性等技术特点,满足未来新

型电力系统在“绿色、灵活、多元互动、高度市场化”方面的运行需求,是重要的技术支撑,可以预期,虚拟电厂在国内势必会迎来良好的发展。

随着数字革命的推进,大数据、云计算、边缘技术、人工智能技术使得虚拟电厂获得了智能化资源识别、场景资源适配、广域调度能力,移动互联、物联网技术使得分布式资源的规模化聚合问题得以解决,可以预测,数字化、智能化、云共享、人工智能、大数据、物联网等方面的发展都会推动虚拟电厂的发展。

## 参考文献:

- [1] HUI H X, DING Y, SHI Q X, et al. 5G network - based Internet of Things for demand response in smart grid: A survey on application potential [J]. Applied Energy, 2020, 257:113972-113986.
- [2] 张凯杰,丁国锋,闻铭,等.虚拟电厂的优化调度技术与市场机制设计综述[J].综合智慧能源,2022,44(2):60-72. ZHANG Kaijie, DING Guofeng, WEN Ming, et al. Review of optimal dispatching technology and market mechanism design for virtual power plants [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(2):60-72.
- [3] 林毓军,苗世洪,杨炜晨,等.面向多重不确定性环境的虚拟电厂日前优化调度策略[J].电力自动化设备,2021,41(12):143-150. LIN Yujun, MIAO Shihong, YANG Weichen, et al. Day-ahead optimal scheduling strategy of virtual power plant for environment with multiple uncertainties [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(12):143-150.
- [4] 邹云阳,杨莉.基于经典场景集的风光水虚拟电厂协同调度模型[J].电网技术,2015,39(7):1855-1859. ZOU Yunyang, YANG Li. Synergetic dispatch models of a wind/PV/hydro virtual power plant based on representative scenario set [J]. Power System Technology, 2015, 39(7):1855-1859.
- [5] 刘东,樊强,尤宏亮,等.泛在电力物联网下虚拟电厂的研究现状与展望[J].工程科学与技术,2020,52(4):3-12. LIU Dong, FAN Qiang, YOU Hongliang, et al. Research status and trends of virtual power plants under electrical Internet of Things [J]. Advanced Engineering Sciences, 2020, 52(4):3-12.
- [6] 刘方,徐耀杰,杨秀,等.考虑电能交互共享的虚拟电厂集群多时间尺度协调运行策略[J].电网技术,2022,46(2):642-656. LIU Fang, XU Yaojie, YANG Xiu, et al. Multi-time scale coordinated operation strategy of virtual power plant clusters considering power interactive sharing [J]. Power System Technology, 2022, 46(2):642-656.

- [7] 艾芊. 虚拟电厂——能源互联网的终极组态[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [8] 钟永洁, 孙永辉, 王庭华, 等. 电热气互联能源系统动态环保经济协同灵活性调度[J]. 电网技术, 2020, 44(7): 2458-2470.  
ZHONG Yongjie, SUN Yonghui, WANG Tinghua, et al. Dynamic environmental economic and collaborative flexibility dispatch of integrated power, heat and natural gas energy system[J]. Power System Technology, 2020, 44(7): 2458-2470.
- [9] BHUIYAN E A, HOSSAIN M Z, MUYEEN S M, et al. Towards next generation virtual power plant: Technology review and frameworks [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 150: 111358.
- [10] 刘思源, 艾芊, 郑建平, 等. 多时间尺度的多虚拟电厂双层协调机制与运行策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(3): 753-761.  
LIU Siyuan, AI Qian, ZHENG Jianping, et al. Bi-level coordination mechanism and operation strategy of multi-time scale multiple virtual power plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3): 753-761.
- [11] 徐峰, 何宇俊, 李建标, 等. 考虑需求响应的虚拟电厂商业机制研究综述[J]. 电力需求侧管理, 2019, 21(3): 2-6.  
XU Feng, HE Yujun, LI Jianbiao, et al. Review of research on commercial mechanism for virtual power plant considering demand response [J]. Power Demand Side Management, 2019, 21(3): 2-6.
- [12] 张涛, 王成, 王凌云, 等. 考虑虚拟电厂参与的售电公司双层优化调度模型[J]. 电网技术, 2019, 43(3): 952-960.  
ZHANG Tao, WANG Cheng, WANG Lingyun, et al. A bi-level optimal dispatching model of electricity retailers integrated with VPPs[J]. Power System Technology, 2019, 43(3): 952-960.
- [13] CHEN T, ZHANG B, POURBABAK H, et al. Optimal routing and charging of an electric vehicle fleet for high-efficiency dynamic transit systems [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4): 3563-3572.
- [14] 钟永洁, 李玉平, 胡兵, 等. 基于合作博弈的能源互联网经济能效分层协同优化调度[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(1): 55-64.  
ZHONG Yongjie, LI Yuping, HU Bing, et al. Hierarchical collaborative optimal scheduling of economy energy efficiency in Energy Internet based on cooperative game [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(1): 55-64.
- [15] LI W, LIN Z, ZHOU H, et al. Multi-objective optimization for cyber-physical-social systems: A case study of electric vehicles charging and discharging [J]. IEEE Access, 2019 (7): 76754-76767.
- [16] 袁桂丽, 贾新潮, 房方, 等. 虚拟电厂源荷双侧热电联合随机优化调度[J]. 电网技术, 2020, 44(8): 2932-2940.  
YUAN Guili, JIA Xinchao, FANG Fang, et al. Joint stochastic optimal scheduling of heat and power considering source-side and load-side of virtual power plant [J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 2932-2940.
- [17] 张亚朋, 穆云飞, 贾宏杰, 等. 电动汽车虚拟电厂的多时间尺度响应能力评估模型[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(12): 94-103.  
ZHANG Yapeng, MU Yunfei, JIA Hongjie, et al. Response capability evaluation model with multiple time scales for electric vehicle virtual power plant [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(12): 94-103.
- [18] XIE K, HUI H X, DING Y. Review of modeling and control strategy of thermostatically controlled loads for virtual energy storage system [J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(1): 1-13.
- [19] 彭院院, 周任军, 李斌, 等. 计及光热发电特性的光-风-火虚拟电厂双阶段优化调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(4): 21-28.  
PENG Yuanyuan, ZHOU Renjun, LI Bin, et al. Two-stage optimal dispatch model for solar-wind-thermal virtual power plant considering the characteristic of concentrating solar power [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(4): 21-28.
- [20] 周任军, 徐健, 王仰之, 等. 利用市场交易奖惩措施的风电-垃圾焚烧虚拟电厂优化运行[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(10): 90-96.  
ZHOU Renjun, XU Jian, WANG Yangzhi, et al. Optimized operation of virtual power plant with wind power and waste incineration based on market trading incentives [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(10): 90-96.
- [21] 李旭东, 艾欣, 胡俊杰, 等. 计及碳交易机制的核-火-虚拟电厂三阶段联合调峰策略研究[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2460-2470.  
LI Xudong, AI Xin, HU Junjie, et al. Three-stage combined peak regulation strategy for nuclear-thermal-virtual power plant considering carbon trading mechanism [J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2460-2470.
- [22] 王宣元, 刘敦楠, 刘蓁, 等. 泛在电力物联网下虚拟电厂运营机制及关键技术[J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3175-3183.  
WANG Xuanyuan, LIU Dunnan, LIU Zhen, et al. Operation mechanism and key technologies of virtual power plant under ubiquitous internet of things [J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3175-3183.
- [23] 何奇琳, 艾芊. 售电侧放开环境下含需求响应虚拟电厂的电力市场竞价策略[J]. 电力建设, 2019, 40(2): 1-10.  
HE Qilin, AI Qian. Bidding strategy of electricity market including virtual power plant considering demand response under retail power market deregulation [J]. Electric Power

- Construction, 2019, 40(2): 1-10.
- [24] LUO Z, HONG S H, DING Y M. A data mining - driven incentive - based demand response scheme for a virtual power plant[J]. Applied Energy, 2019, 239: 549-559.
- [25] 叶季蕾, 李斌, 张宇, 等. 基于全球能源互联网典型特征的储能需求及配置分析[J]. 发电技术, 2021, 42(1): 20-30.
- YE Jilei, LI Bin, ZHANG Yu, et al. Energy storage requirements and configuration analysis based on typical characteristics of global energy internet [J]. Power Generation Technology, 2021, 42(1): 20-30.
- [26] 齐军, 杨帅帅, 张红光, 等. 基于机会约束规划的含储能虚拟电厂调度模型[J]. 工业技术创新, 2019, 6(1): 70-76.
- QI Jun, YANG Shuaishuai, ZHANG Hongguang, et al. Dispatch model for energy storage virtual power plant based on chance constrained programming [J]. Industrial Technology Innovation, 2019, 6(1): 70-76.
- [27] 卫志农, 陈好, 黄文进, 等. 考虑条件风险价值的虚拟电厂多电源容量优化配置模型[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 39-46.
- WEI Zhinong, CHEN Yu, HUANG Wenjin, et al. Optimal allocation model for multi-energy capacity of virtual power plant considering conditional value-at-risk [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 39-46.
- [28] 吕梦璇, 姜素华, 刘建琴, 等. 含高比例风电的虚拟电厂多类型备用协调优化[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(10): 2874-2882.
- LV Mengxuan, LOU Suhua, LIU Jianqin, et al. Coordinated optimization of multi - type reserve in virtual power plant accommodated high shares of wind power [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(10): 2874-2882.
- [29] 应志玮, 余涛, 黄宇鹏, 等. 上海虚拟电厂运营市场出清的研究与实现[J]. 电力学报, 2020, 35(2): 129-134.
- YING Zhiwei, YU Tao, HUANG Yupeng, et al. Research on clearing the operation market of Shanghai virtual power plant [J]. Journal of Electric Power, 2020, 35(2): 129-134.
- [30] 彭维珂, 聂椿明, 陈衡, 等. 基于智能算法的空冷发电机组负荷预测研究[J]. 华电技术, 2021, 43(3): 57-64.
- PENG Weike, NIE Chunming, CHEN Heng, et al. Study on load forecasting for air cooling thermal power units based on intelligent algorithm [J]. Huadian Technology, 2021, 43(3): 57-64.
- [31] CHAUDHARI K, KANDASAMY N K, KRISHNAN A, et al. Agent-based aggregated behavior modeling for electric vehicle charging load [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 15(2): 856-868.
- [32] 李嘉媚, 艾芊. 考虑调峰辅助服务的虚拟电厂运营模式[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(6): 1-7.
- LI Jiamei, AI Qian. Operation mode of virtual power plant considering peak regulation auxiliary service [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(6): 1-7.
- [33] 朱誉, 仪忠凯, 陆秋瑜, 等. 基于典型场景集的虚拟电厂与配电网协同定价策略[J]. 电力建设, 2019, 40(6): 74-85.
- ZHU Yu, YI Zhongkai, LU Qiuyu, et al. Collaborative pricing strategy of virtual power plant and distribution network considering typical scenes [J]. Electric Power Construction, 2019, 40(6): 74-85.
- [34] YI Z K, XU Y L, GU W, et al. A multi-time-scale economic scheduling strategy for virtual power plant based on deferrable loads aggregation and disaggregation [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(3): 1332-1346.
- [35] BABAEI S, ZHAO C Y, FAN L. A data-driven model of virtual power plants in day-ahead unit commitment [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6): 5125-5135.
- [36] 钟永洁, 孙永辉, 谢东亮, 等. 含电-热-气-冷子系统的区域综合能源系统多场景优化调度[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(12): 76-84.
- ZHONG Yongjie, SUN Yonghui, XIE Dongliang, et al. Multi - scenario optimal dispatch of integrated community energy system with power-heating-gas-cooling subsystems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(12): 76-84.
- [37] 陈雯, 孙荣峰, 邱靖, 等. 考虑电池寿命的虚拟电厂调频竞标模型及合作利润分配策略[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(4): 374-384.
- CHEN Wen, SUN Rongfeng, QIU Jing, et al. Profit allocation and frequency regulation bidding strategy of virtual power plant considering battery cycle life [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(4): 374-384.
- [38] 吕梦璇, 姜素华, 刘建琴, 等. 含高比例风电的虚拟电厂多类型备用协调优化[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(10): 2874-2882.
- LV Mengxuan, LOU Suhua, LIU Jianqin, et al. Coordinated optimization of multi - type reserve in virtual power plant accommodated high shares of wind power [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(10): 2874-2882.
- [39] 秦羽飞, 葛磊蛟, 王波. 能源互联网群体智能协同控制与优化技术[J]. 华电技术, 2021, 43(9): 1-13.
- QIN Yufei, GE Leijiao, WANG Bo. Swarm intelligence collaborative control and optimization technology of Energy Internet [J]. Huadian Technology, 2021, 43(9): 1-13.
- [40] 电享科技. 新型储能|虚拟电厂浅析(上)[EB/OL]. (2022-04-21) [2022-05-01]. <https://www.powershare.com.cn/cn/dianxiangongsi/xinwenzixun/498.html>.
- [41] 电享科技. 新型储能|虚拟电厂浅析(下)[EB/OL].

(2022-04-21) [2022-05-01]. <https://www.powershare.com.cn/cn/dianxiangongsi/xinwenzixun/499.html>.

[42] 王晓海, 徐静静, 胡永锋, 等. 新形势下发电企业在综合能源服务领域的业务分析[J]. 综合智慧能源, 2022, 44(3):9-16.

WANG Xiaohai, XU Jingjing, HU Yongfeng, et al. Business analysis on integrated energy services of power generation enterprises under the new circumstances [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(3):9-16.

[43] 钱国明, 丁泉, 黄超, 等. 基于价值链视角的发电企业参与综合能源服务策略[J]. 华电技术, 2021, 43(4):28-33.

QIAN Guoming, DING Quan, HUANG Chao, et al. Integrated energy service strategy with participation of

power generation enterprises from the perspective of value chain[J]. Huadian Technology, 2021, 43(4):28-33.

(本文责编:张帆)

作者简介:

钟永洁(1990), 男, 高级设计师, 硕士, 从事虚拟电厂技术, 综合能源系统、能源互联网建模及其优化等方面的研究工作, zhongyongjieemail@163.com;

纪陵(1982), 男, 高级工程师, 硕士, 从事电力系统自动化、智能变电站技术、虚拟电厂技术等方面的研究工作, lingji@sac-china.com;

李靖霞(1973), 女, 高级工程师, 博士, 从事虚拟电厂技术, 智能变电站技术、电力系统自动化技术等方面的研究工作, jingxia-li@sac-china.com。

\*\*\*\*\*

“以新能源为主体的新型电力系统多主体智能决策”专刊征稿启事

以新能源为主体的新型电力系统是实现“碳达峰、碳中和”的重要基础, 是清洁低碳安全高效能源体系的重要组成部分。新型电力系统中决策主体繁多, 包括传统能源和新能源发电商、新增供电实体、售电商(包括负荷聚合商)、电网公司、电力用户等, 导致整个系统决策环境异常复杂, 不同主体间存在竞争与合作的复杂利益关系, 因而可将电力系统多主体优化决策问题转化为某种特殊形式的博弈问题, 主要包括多目标优化、鲁棒控制与鲁棒优化、完全理性与有限理性交易决策、多层优化、安全防护和系统演化等。静态博弈、微分博弈、零和博弈、主从博弈、安全博弈和演化博弈等博弈模型可有效揭示新型电力系统调度、优化、控制与决策问题的博弈内涵, 贴合实际场景, 切实解决新型电力系统多主体决策问题。

为此, 《综合智慧能源》邀请广州大学程乐峰副教授、东南大学高赐威教授和广西大学殷林飞助理教授担任特约主编, 主持并组织“以新能源为主体的新型电力系统多主体智能决策”专刊。专刊涵盖电力系统规划、调度、控制、电力经济、市场交易、电网安全及电网演化等内容, 旨在为读者在应用工程博弈论解决实际问题时提供借鉴与参考。真诚邀请国内外相关领域专家、学者以及国家级科研计划承担单位积极撰文、踊跃投稿!

一、专题征稿范围(包括但不限于)

(1) 新型电力系统规划智能决策问题(含新能源规划、输电规划、网架结构规划、可再生能源定容等)研究。(2) 新型电力系统调度智能决策问题(含新能源调度、机组组合、备用整定、实时调度等)研究。(3) 新型电力系统控制智能决策问题(含分布式电源协同控制、微电网控制、配电网控制等)研究。(4) 新型电力系统鲁棒优化与多层优化智能决策问题研究。(5) 新型电力系统安全防护与安全博弈智能决策问题研究。(6) 新型电力系统多主体决策博弈(含综合能源交易、碳排放权交易、电-碳市场交易、竞价上网、电源规划、需求侧管理、市场监管、车联网互动等)与新能源接入下的电网演化问题研究。

二、时间进度

专刊拟于2022年10月31日截稿, 择期优先出版。

三、征稿要求

- (1) 专题只收录未公开发表的论文, 拒绝一稿多投。作者对论文内容真实性和客观性负责。
- (2) 按照《综合智慧能源》论文格式要求使用 Word 软件排版, 请登录《综合智慧能源》在线采编系统(www.hdpower.net 或 www.ienergy.cn) 下载中心下载论文模板。
- (3) 请保留论文图片、曲线和表格原始文件, 并在投稿时按规定提交。
- (4) 论文作者应遵守相关学术不端规定。

四、投稿方式

- (1) 在线投稿(推荐): 登录《综合智慧能源》在线采编系统(www.hdpower.net 或 www.ienergy.cn), 完成在线全文投稿, 欢迎投稿时推荐审稿人。
- (2) 邮箱投稿: chengleifeng@gzhu.edu.cn(程教授); ciwei.gao@126.com(高教授); yinlinfei@gxu.edu.cn(殷教授); hdjs-chd@vip.163.com(编辑部)。
- (3) 咨询联系: 刘芳 0371-58501060, 13838002988; 杨满成 010-63918755, 13801175292。