

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2022.02.009

# 虚拟电厂的优化调度技术与市场机制设计综述

Review of optimal dispatching technology and market mechanism design for virtual power plants

张凯杰<sup>1</sup>, 丁国锋<sup>1\*</sup>, 闻铭<sup>1</sup>, 惠红勋<sup>2</sup>, 丁一<sup>3</sup>, 贺民<sup>1</sup>, 褚杰锋<sup>1</sup>, 谢康<sup>3</sup>, 俞楚天<sup>4</sup>, 张利军<sup>4</sup>  
ZHANG Kaijie<sup>1</sup>, DING Guofeng<sup>1\*</sup>, WEN Ming<sup>1</sup>, HUI Hongxun<sup>2</sup>, DING Yi<sup>3</sup>, HE Min<sup>1</sup>,  
CHU Jiefeng<sup>1</sup>, XIE Kang<sup>3</sup>, YU Chutian<sup>4</sup>, ZHANG Lijun<sup>4</sup>

(1. 国网浙江省电力有限公司宁波供电公司, 浙江 宁波 315016; 2. 澳门大学 智慧城市物联网国家重点实验室, 澳门特别行政区 999078; 3. 浙江大学 电气工程学院, 杭州 310027; 4. 国网浙江省电力有限公司经济技术研究院, 杭州 310016)

(1.State Grid Ningbo Electric Power Supply Company, Ningbo 315016, China; 2.State Key Laboratory of Internet of Things for Smart City, University of Macau, Macau 999078, China; 3.College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 4.Economic and Technological Research Institute of State Grid Zhejiang Electric Power Company Limited, Hangzhou 310016, China)

**摘要:**为应对环境污染的持续加剧和化石燃料的日益短缺,推进落实“双碳”目标,风电、光伏等可再生能源在电网中的接入比例不断提高。然而,可再生能源发电具有间歇性和波动性,且接入位置分散,增加了电力系统安全稳定运行的难度。虚拟电厂的提出为解决可再生能源问题提供了新思路,阐述了虚拟电厂(VPP)的概念与实现架构,并从综合能源、电动汽车、可再生能源3个角度分析了VPP参与系统运行优化调度的关键技术,分别实现与电、热、气等综合能源的交互并降低系统运行成本,缓解电动汽车无序充放电对电网产生的负面影响,平抑可再生能源的间歇性和波动性出力。此外阐述了市场环境下VPP基于博弈论等方法的策略,并梳理了VPP典型工程应用,为我国VPP的建设与发展提供借鉴。

**关键词:**虚拟电厂;综合能源;电动汽车;可再生能源;碳中和;市场机制;需求响应;分布式能源;能源互联网

**中图分类号:**TK 01:TM 73      **文献标志码:**A      **文章编号:**2097-0706(2022)02-0060-13

**Abstract:** In order to cope with the continuous aggravation of environmental pollution and increasing shortage of fossil fuels, the proportion of renewable energy such as wind power and photovoltaic in power grid has been soaring. However, renewable energy power generation is intermittent and fluctuating, and its access points are scattered, which increases the difficulty of safe and stable operation of the system. Virtual power plants provide a new train of thought for the problem above. The concept and implementation architecture of a VPP are expounded. The key technologies for VPPs to participate in power system optimal operation scheduling are analyzed from three perspectives, integrated energy, electric vehicles and renewable energy. The technologies realize the interaction between electricity, heat, gas and other integrated energy, lower the operating cost of the system, alleviate the side effects of disordered charging and discharging of electric vehicles on the power grid, and suppressed the intermittent and fluctuating output of renewable energy as well. In addition, the VPP's market strategies based on game theory and other methods under market environment are analyzed. Sorting out the typical engineering applications of VPPs can provide reference for the construction and development of VPPs in China.

**Keywords:** virtual power plant; integrated energy; electric vehicle; renewable energy; carbon neutrality; market mechanism; demand response; distributed energy storage; energy internet

## 0 引言

能源危机的日益加深及化石燃料带来的环境污染,使可再生能源在全球范围内得到广泛应用。

然而,可再生能源发电的可预测性有限,与传统发电机组相比具有间歇性和波动性特征,使得可再生能源的调度变得十分困难<sup>[1]</sup>。为实现可再生能源的最佳高效利用,国内外已经进行了大量研究,其中需求响应(Demand Response, DR)和分布式储能(Distributed Storage, DS)被认为是2种关键且潜力

巨大的方案。DR通过信息通信技术,向电力用户提供变动电价或激励措施,引导用户调节用电行为,从而达到消纳间歇性可再生能源<sup>[2-3]</sup>、削峰填谷等目的<sup>[4-5]</sup>。DS通过调节储能设备的充放电状态和功率大小,平衡可再生能源发电给系统带来的波动性<sup>[6-7]</sup>。与DR相比,DS的调节速度更快,可以更好地参与电力系统调频等快速调节服务<sup>[8]</sup>。

为了实现可再生能源、DR以及DS的有效整合,更好地促进电力系统运行的安全性、稳定性和经济性,虚拟电厂(Virtual Power Plant, VPP)的概念应运而生。VPP是通过先进的通信技术,将区域内的各种分布式电源、储能系统以及可控负荷等聚合成一个整体,实现高效的能源交互,提高电网运行的稳定性<sup>[9-11]</sup>。目前已有大量研究聚焦于风电、光伏及储能系统的整合与协同调度,实现VPP最优化运营,平抑可再生能源引入的系统波动,充分挖掘可再生能源的发电潜力<sup>[12-14]</sup>。

此外,在电源侧,发展综合能源是全球能源未来发展的趋势,通过气、热等储能形式实现不同能源的梯级利用,提高终端能源利用效率,同时提升电力系统灵活性。因此,VPP与综合能源的协同优化调度逐渐受到更多关注,文献[15-16]分别将风电机组和燃气热电联产机组,热电机组、燃气锅炉和风电机组组成虚拟电厂,实现平抑风电波动、降低发电成本的目标。

在负荷侧,快速增加的电动汽车(Electric Vehicle, EV)具有储能能力,显示出与电力系统灵活互动的巨大优势<sup>[17-18]</sup>。然而,大规模电动汽车接入电网充电,也会造成新的负荷增长,加剧电网负荷峰谷差<sup>[19]</sup>。VPP的出现为有效管理日益增多的EV提供了新的方法,可更大限度发挥EV在降低成本等方面的优势。

本文从综合能源、EV、可再生能源3个角度入手,对VPP参与系统优化运行的关键技术进行剖析,并研究梳理VPP参与电力市场的竞价策略和商业模式<sup>[20-21]</sup>。首先,本文对VPP的定义进行了全面透彻的阐述,并介绍了VPP的实现架构;然后,从冷热电气等综合能源、电动汽车以及风电光伏等可再生能源3个角度入手,论述了VPP参与电力系统优化调度的关键技术;最后,详细介绍了VPP相关的市场机制实现综合电力系统综合效益最大化,并介绍了世界范围内VPP的典型工程应用。

## 1 VPP的功能与定义

VPP作为一项蓬勃发展的技术,有多种不同角度的定义。VPP这一概念,最早起源于1997年

Shimon Awerbuch博士的著作《虚拟公共设施:新兴产业的描述、技术及竞争力》,其中对虚拟公共设施进行了定义<sup>[22]</sup>。虚拟公共设施被定义为独立实体间的一种灵活合作,这些实体受市场驱动,能够为消费者提供所需的高效电能服务而不必拥有相应的资产<sup>[22]</sup>。此后,行业内众多专家学者都发表了各自的观点与见解,但由于这些研究各具特点,对VPP的研究侧重也不尽相同,学术领域尚未形成对VPP这一概念准确而统一的定义。

文献[9]将VPP定义为分布式发电机组、柔性负荷和储能系统的有机组合,它们作为一个整体在控制中心的管理下参与电网运行。文献[10]中VPP被定义为一种先进的区域性电能集中管理模式,依靠这种模式,在不改变电网结构的前提下,可以有效整合区域内各种形态的电源和用电负荷,并经济高效地控制区域内的发电和用电单元。文献[11]将虚拟电厂视为能源互联网技术的一个典型代表,利用先进的信息技术,将大量分散安装的分布式电源、受控负荷和储能单元聚合起来,实现广域范围的能源互联与共享。文献[23]将VPP看作一种需求侧响应的实现方式,通过在电力需求侧安装特定装置,提高用电能效调节用电需求,达到与实际发电厂相同的效果,也称为“能效电厂”。文献[24]将VPP定义为在不改变现有电网网络拓扑结构的前提下,通过先进的测量、通信和控制技术,由不同类型、不同地域的分布式电源聚合而成的发电联合体。文献[25]从狭义和广义2个层面对VPP进行了描述,狭义上的VPP由直接并网的分布式发电机组和储能装置组成,广义上的VPP还包括需求侧的可控负荷、电动汽车等灵活性资源。

在工程实践中,FENIX(Flexible Electricity Network to Integrate Expected Energy Solution)项目定义VPP为众多分布式电源经过整合接入电网后,通过关键传输机制作为配电网和输电网的控制源,并通过综合表征各分布式电源的参数建立整体的运行模式,为系统提供频率控制、电压控制、潮流控制,降低系统运行费用和电能输送成本,提升系统的安全性和可靠性<sup>[26]</sup>,如图1所示。图中DER(Distributed Energy Resource)为分布式能源。

综上所述,VPP技术的核心由2点组成,其一为“通信”,其二为“控制”。“通信”是指VPP通过先进的通信装置和技术,将分布式电源、储能系统以及需求侧灵活负荷聚合为一个有机整体,具备协调优化调度的能力。“控制”是指通过各类优化算法对VPP内的组成元素进行调度控制,实现对分布式电源发电、储能充放电以及可控负荷的灵活调节。

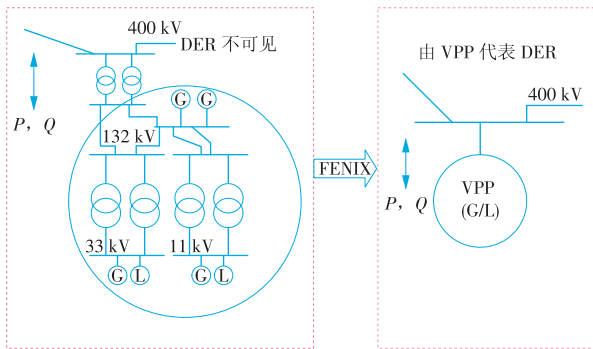


图1 FENIX项目中的VPP架构

Fig. 1 VPP architecture in FENIX project

## 2 VPP的典型控制架构

VPP的控制对象主要包括各种分布式电源、储能系统、可控负荷以及电动汽车,控制结构主要包括集中控制、集中-分散控制、完全分散控制3类,分别如图2—4所示<sup>[10,22,26]</sup>。

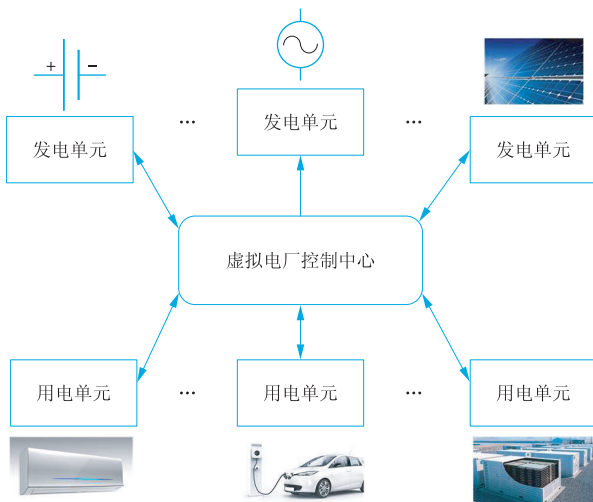


图2 集中控制结构

Fig. 2 Centralized control structure

(1)集中控制结构中,VPP的全部负荷信息均传递至控制协调中心(Control Coordination Center, CCC),CCC拥有对VPP中所有单元的控制权,制定各单元的发电或用电计划。CCC控制力强且控制手段灵活,但通信压力大且计算量繁重,兼容性和扩展性也不理想。

(2)集中-分散控制结构中,VPP被分为2个层级,分别为低层控制和高层控制。在低层控制中,本地控制中心管理本区域内有限个发用电单元,彼此进行信息交换,并将汇集的信息传递到高层控制中心;高层控制中心将任务分解并分配到各本地控制中心,然后本地控制中心负责制定每一个单元的发电或用电具体方案。此结构有助于改善集中控制方式下的数据拥堵问题,并使扩展性得到提升。

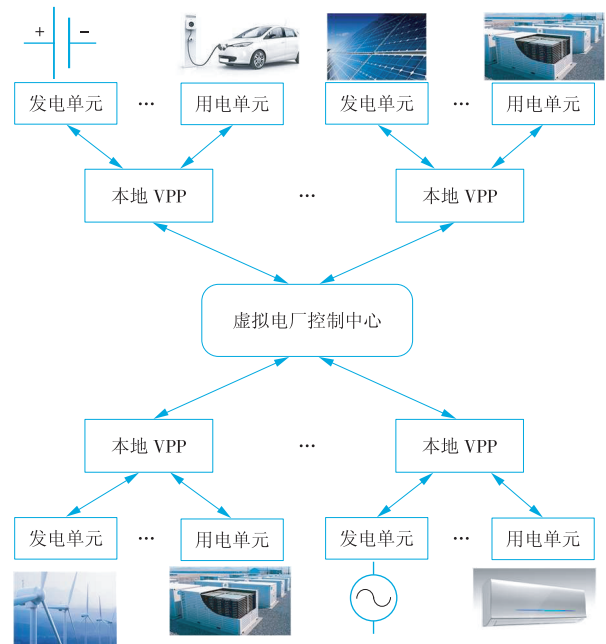


图3 集中-分散控制结构

Fig. 3 Centralized-decentralized control structure

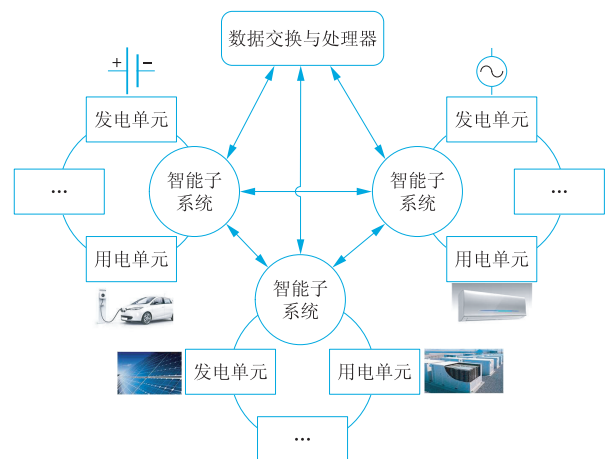


图4 完全分散控制结构

Fig. 4 Fully decentralized control structure

(3)完全分散控制结构中,VPP被划分为若干个自治的智能子系统,这些子系统通过各自的智能代理彼此通信并相互协作,实现集中控制结构中控制中心的功能,控制中心则成为数据交换与处理中心。

VPP的优化调度主要是利用先进的通信技术和控制策略,对内部的分布式电源进行聚合,调节它们的出力,使之参与电力市场和辅助服务市场的运行。其目标为在满足用户负荷需求的前提下,使发电成本、污染物或碳排放量最小。目前主流的VPP模型目标函数为<sup>[27-32]</sup>

$$\max P_{\text{rofit}} = P_{\text{rofit}}^{\text{out}} + P_{\text{rofit}}^{\text{in}} - C_{\text{market}}^{\text{punish}} - C_{\text{dg}} - C_{\text{wind}} - C_{\text{pv}} - C_{\text{bat}} - C_{\text{DR}}, \quad (1)$$

式中: $P_{\text{rofit}}^{\text{out}}$ 和 $P_{\text{rofit}}^{\text{in}}$ 分别为VPP从电力市场和内部售电获利; $C_{\text{market}}^{\text{punish}}$ 为当VPP实际出力不满足合同要求时进



行的赔偿; $C_{dg}$ 为燃气轮机的综合成本,包括运行成本、启停成本、备用成本等; $C_{wind}$ 为风电的弃风成本和运行维护成本的总和; $C_{pv}$ 为光伏的弃光成本和运行维护成本的总和; $C_{bat}$ 为电池的充放电使用成本; $C_{DR}$ 为VPP中的DR成本。具体的表达式可根据实际研究的侧重点进行定义。同时,VPP优化调度还需满足以下约束条件。

(1)燃气轮机约束:

$$\begin{cases} P_{dg,i}^{\min} \leq P_{dg,i}^t + R_{dg,i}^t \leq P_{dg,i}^{\max} \\ P_{dg,i}^{\downarrow} \leq P_{dg,i}^{t+1} - P_{dg,i}^t \leq P_{dg,i}^{\uparrow} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $P_{dg,i}^{\max}$ 和 $P_{dg,i}^{\min}$ 分别为第*i*个燃气轮机功率的上、下限; $P_{dg,i}^{\uparrow}$ 和 $P_{dg,i}^{\downarrow}$ 分别为第*i*个燃气轮机向上、向下爬坡的功率限值; $P_{dg,i}^t$ 为第*i*个燃气轮机*t*时刻功率; $R_{dg,i}^t$ 为第*i*个燃气轮机*t*时刻备用容量。

(2)风电、光伏约束:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{wind,i}^t \leq P_{wind,i}^{pre} \\ 0 \leq P_{pv,i}^t \leq P_{pv,i}^{pre} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $P_{wind,i}^t$ 和 $P_{pv,i}^t$ 分别为*t*时刻第*i*个风电、光伏机组可调度功率; $P_{wind,i}^{pre}$ 和 $P_{pv,i}^{pre}$ 分别为预测的*t*时刻第*i*个风电、光伏机组可调度功率。

(3)储能充放电约束:

$$\begin{cases} SOC_i^{\min} \leq SOC_{bat,i}^t \leq SOC_i^{\max} \\ SOC_{bat,i}^t = SOC_{bat,i}^{t-1} + P_{bat,i}^t \\ P_{bat,i}^{\text{discharge}} \leq P_{bat,i}^t \leq P_{bat,i}^{\text{charge}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $SOC_i^{\max}$ 和 $SOC_i^{\min}$ 分别为第*i*个储能设备的容量和最小储能值; $P_{bat,i}^{\text{charge}}$ 和 $P_{bat,i}^{\text{discharge}}$ 分别为第*i*个储能设备的最大充电功率和最大放电功率。

(4)DR约束:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{curt,i}^t \leq P_{curt,i}^{\max} \\ \sum_{i=1, i \in \text{VPP}}^N P_{curt,i}^t = P_{curt}^t \end{cases} \quad (5)$$

式中: $P_{curt,i}^t$ 为*t*时刻第*i*个DR用户的中断负荷功率; $P_{curt}^t$ 为*t*时刻VPP中所有DR用户的中断负荷功率; $N$ 为VPP中DR用户的数量; $P_{curt,i}^{\max}$ 为*t*时刻第*i*个DR用户的中断负荷功率上限。

(5)系统功率平衡约束:

$$P_{dg}^t + P_{wind}^t + P_{pv}^t + P_{bat}^t + P_{curt}^t = P_{load}^t + P_m^t \quad (6)$$

式中: $P_{load}^t$ 为VPP的内负荷功率; $P_m^t$ 为VPP向能量市场提供的功率,正值代表向能量市场输出功率,负值代表从能量市场输入功率。

(6)线路潮流与母线电压约束:

$$\begin{cases} P_{ij}^t \leq P_{ij}^{\max} \\ U_i^{\min} \leq U_i^t \leq U_i^{\max} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $P_{ij}^t$ 为节点*i,j*之间支路的传输功率; $P_{ij}^{\max}$ 为节点*i,j*之间支路的传输功率极限; $U_i^t$ 为节点电压; $U_i^{\min}$ 和 $U_i^{\max}$ 分别为节点电压的下、上限。

### 3 VPP的优化调度技术

#### 3.1 VPP对综合能源的优化调度

近年来,随着综合能源概念的不断发展和能源行业的发展模式愈加要求高效、安全和可持续,VPP可以有效帮助冷热电联供(Combined Cooling, Heating and Power, CCHP)型综合能源系统实现协调优化控制。VPP参与能量市场和旋转备用市场,可以加强系统内部各单元间的协调调度,提高系统决策灵活性,获得更为可观的经济效益。文献[32]在考虑热电联产机组参与旋转备用市场情景下,建立了能量市场和旋转备用市场下VPP的日前热电联合调度优化模型,针对VPP面临的不确定性和由此带来的风险,采用鲁棒优化处理能量市场(Energy Market, EM)电价、旋转备用市场(Spinning Reserve Market, SRM)电价、风电出力、光伏出力、电负荷和热负荷的不确定性,降低了系统风险。文献[33]研究了包含风电供热的VPP“热电解耦”负荷优化调度,提出了将供热区域内的大型热电厂、风力发电、光伏发电整合成VPP参与电网运行,并加入风电供热作为热负荷侧可调度资源,构建了含风电供热的全因素VPP热电负荷优化调度模型,设计了VPP运行策略及偏差补偿策略。文献[34]则针对燃煤热电联产机组“以热定电”的运行方式造成的灵活调节能力不足的问题,运用基于拉丁超立方采样的场景法处理风光出力的不确定性,提出了一种基于实时电价的VPP运行策略,优先利用新能源发电,在获得较好经济效益的同时,使电力系统的运行更加低碳、安全。文献[35]在之前的基础上加入了冷负荷,建立了多区域VPP综合能源协调调度优化模型,该模型考虑了VPP内不同区域间的冷、热、电交互,以及区域内的冷、热、电互补问题,将单区域VPP的热电协调调度优化问题扩展到多区域VPP的冷热电协调调度优化问题。文献[36]在VPP中进一步增加了电转气单元,同时考虑VPP参与由EM, SRM及天然气市场组成的多种市场,并提出了参与多种市场的电、热、气协调优化调度模型。

综上所述,VPP通过双向通信技术实现发电侧、需求侧、电力交易市场等各个部分的信息与数据的调度,可有效提升系统的能源利用效率,使系统运行更加灵活可靠,充分实现了资源的优化配置。

#### 3.2 VPP对电动汽车的优化调度

EV因其节能、零排放的优点,近年来得到了快速发展,但大规模EV接入电网充电时会加剧电网峰谷差,对电网运行的安全稳定造成影响。然而,通过VPP聚合EV既可有效缓解EV无序充放电给

电网产生的负面影响,又可丰富电力系统的运行和控制手段,使 VPP 参与系统削峰填谷、提供频率稳定和备用容量等辅助服务<sup>[19]</sup>。

文献[37]针对慢充 EV 集群,提出了一种电动汽车虚拟电厂(Electric Vehicle Virtual Power Plant, EVVPP)多时间尺度响应能力评估模型,在日前对 EVVPP 响应能力进行评估,日内基于响应时间裕度和荷电状态裕度对 EVVPP 响应能力进行滚动修正,分析了 EV 状态变化对 EVVPP 响应能力的影响。

此外, EV 并网时的鲁棒优化也是 VPP 应用中人们密切关注的一个核心问题。文献[19]为解决可调度电动汽车数量的随机性与不确定性问题,构建了含电动汽车的虚拟电厂鲁棒随机优化调度模型,并分析了 VPP 和 EV 对日运行成本及环境的影响。文献[38]建立了含 VPP 的双层逆鲁棒优化调度模型,分析了风电消纳水平和电动汽车入网充放电功率之间的极限制约关系。

### 3.3 VPP 对可再生能源的优化调度

随着我国经济社会的快速发展,化石燃料大量燃烧带来的环境问题日益突出, VPP 中的分布式电源多以风电、光伏为主,其绿色低碳的特性可有效缓解能源危机。然而,可再生能源发电站具有间歇性或随机性以及存在预测误差等特点<sup>[22]</sup>,并网后会在一定程度上对电网运行的稳定性造成不利影响。

针对可再生能源的波动性,提高风电、光伏等可再生能源的功率预测精度能有效缓解这一问题。文献[39]提出了基于堆叠降噪自编码器的风光功率预测模型,用以实现场站区域风光功率的月度预测。文献[40]采用基于机器学习的集群聚类划分方式,利用每个子区域中的特征电站结合神经网络法实现区域电站未来 3 d 的功率预测。文献[41]以风电功率、光伏发电功率和负荷间的互动耦合关系为依据,提出了基于变量注意力机制-多任务学习的风-光-荷联合预测方法,实现了 15 min 时间尺度上风-光-荷预测精度的同时提升。文献[42]就目前风电场的短期功率预测技术进行了归纳分析,建立了效率高、时间短的风电场短期功率预测模型 SVM\_PSO,实现了 10 min 时间尺度上的功率预测。

VPP 的核心功能是将分布式电源、储能系统(Energy Storage Systems, ESS)、可控负荷等参与对象整合为一个有机整体,其中的储能系统在解决间歇性和波动性方面具有极大优势,大量研究引入 ESS 用于平衡风机和光伏电站出力的随机变化。文献[43]利用 ESS 平抑光伏波动,使得光伏发电的电能质量和经济效益显著提升。文献[44]基于机会约束规划,在 VPP 的优化调度中充分发挥 ESS 平衡风

机出力不确定性的作用,有效降低了系统的失负荷概率和弃风概率。文献[45]利用 ESS 削峰填谷,减少日负荷波动,提升电网消纳风电的能力。文献[46]则构建了含有 ESS 调度和 ESS 优化目标函数的 ESS 优化配置模型,并采用混合整数线性规划和粒子群优化算法进行求解,使 ESS 在 DR、削峰填谷和提高电压质量方面发挥重要作用。文献[47]针对解决分布式电源难以分配、控制和管理的问题,引入 VPP 概念,与能效电厂进行联合调度优化。

建立科学合理的模型,细致量化可再生能源带来的不确定性,也是 VPP 在消纳可再生能源时的一个有效途径。文献[48-49]提出了考虑条件风险价值(CVaR)的 VPP 多电源容量优化配置模型,利用 CVaR 来度量可再生能源出力及市场电价不确定性给规划 VPP 带来的风险,基于成本效益分析获得多电源容量最优配置方案。文献[50]针对大规模风电并网消纳的难题,在风电并网系统的需求侧引入 DR-VPP,提出了一种考虑 DR-VPP 的风电并网系统分布式日前经济调度模型,实现了电网经济调度和风电消纳的全局最优。文献[51-52]在风电的基础上进一步考虑了光伏。文献[51]为促进以风光为代表的分布式能源优化利用,考虑以风险损失后的 VPP 运营净收益最大化为目标,建立随机调度优化模型,利用 CVaR 理论和置信度方法描述 VPP 运行不确定性。文献[52]将光热电站聚合到一般的风火虚拟电厂中,构建了计及光热发电特性的光-风-火虚拟电厂双阶段优化调度模型,充分挖掘了光热电站调节潜力并提升了虚拟电厂调节能力。文献[53]研究了 VPP 参与电力市场的情况,在分析 VPP 在市场中与独立系统运营商(Independent System Operator, ISO)之间运行规则的基础上,设计和引入相关奖惩措施,更大限度减少弃风。文献[54]通过日前经济性和环境效益目标建立多目标优化调度模型,得到日前计划出力值,再以日内滚动优化调度中的最小电源调整量和最小调整成本为目标,于日内滚动修正计划出力值。文献[55]用等效负荷的方法处理风电机组出力,并引入碳交易机制,以系统联合调峰成本最低为优化目标建立核-火-虚拟电厂 3 阶段联合调峰模型,有效降低了系统的运行成本与碳排放。

### 3.4 VPP 中负荷控制的时延优化

由于电力系统电力电量存在实时平衡的特殊性,对其传输网络有低时延和高安全性的要求。面对虚拟电厂中负荷控制多样化高标准的通信服务需求,5G 网络将迎来重大的发展机遇。传统“一刀切”的网络架构已无法解决负荷控制在带宽、时延、



可靠性等方面的个性化需求,网络切片技术为5G通信适应多种类型设备和不同服务的需求,提供了新的思路和解决方案<sup>[56]</sup>。文献[56]定义了电力系统中端到端的时延,将其分为3部分,即固有时延、传播时延、排队时延。

针对负荷控制中具体的时延量化工作,文献[57]提出了一种线性估计模型,用以量化通信时延,同时在分析实验室条件下广域闭环控制系统中设备的操作时延基础上,提出了基于实时数字仿真器硬件在环平台的波形对比测量法,用正态分布拟合操作时延的分布特性。文献[58]在综合考虑了通信时延与操作时延后,以估计实际系统中的闭环时延分布为目标,提出了正态分布模型,以及确定正态分布模型参数的方法。

实际负荷控制迫切需要有效的补偿修正方法来尽可能地减少通信时延对控制流程的影响,实现控制效果的优化。针对此需求,文献[59]将时延补偿与闭环控制系统的实现相结合,提出了一种分层预测补偿方法,通过该预测方法为控制策略提供近似的实时数据,使时延的影响与闭环控制策略隔离,进而保证控制效果。文献[60]针对实际电力系统的负荷调控过程中不可避免的通信时延和参数测量误差,提出了基于云边双端测量和回溯修正的负荷集中-分散控制架构,从而解决了通信时延带来的系统振荡和测量误差带来的容量控制精度问题。

## 4 VPP的市场机制与工程应用

### 4.1 VPP的市场机制

VPP的顺利发展与配套的商业模式关系密切,因此,应加大对VPP竞价策略的研究,使VPP作为一个市场主体,在售电侧逐步放开的环境下尽可能多得从市场中获益。

在市场架构方面,文献[61]从经济资本概念切入,阐述了VPP调度模型中风险计算的经济学含义,并引入条件在险现金流确定VPP经济资本的需求量。文献[62]提出了VPP批发、零售2级市场的商业模式与典型交易组织模式,并结合我国泛在电力物联网建设和电力市场的建设方向,给出了VPP发展建议,即VPP对外参与电力批发市场,对内整合零售市场,基于此项运营特点,构建VPP对内、对外的2级市场交易体系。

在竞价策略方面,对于VPP竞价策略的研究重点主要集中在处理VPP内部资源的不确定性,构建VPP参与市场竞价的相关模型。文献[63]构建了含EV和风电机组的VPP参与日前能量市场和调节市场时的联合最优报价策略,并利用数学编程语言

AMPL(A Mathematical Programming Language)进行求解。文献[64]在考虑用户多种博弈行为的基础上设计研究竞价策略,建立了未来智能电网用户并网多目标优化模型,设计了基于VPP技术的未来智能电网用户并网规则。

在参与模式方面,部分研究又进一步将DR纳入VPP竞价策略的考虑之中。文献[25]将市场导向的DR分为价格型DR和激励型DR,分别对各自参与VPP运营的情况进行了论述。文献[30]分析了VPP同时参与双边合同市场、日前市场、实时市场和平衡市场的3阶段竞标流程,并在此基础上建立了同时参与多类电力市场情况下计及EV和DR的VPP 3阶段竞标模型。文献[65]在对VPP竞价策略进行研究时,一方面考虑售电侧放开对其参与电力市场的影响;另一方面考虑VPP通过聚合各类负荷,采用电价或激励引导其用电行为,使其作为发电资源参与电力市场,构建了售电侧放开环境下计及DR的虚拟电厂参与市场交易的流程。

一般的组织流程为VPP以整体收益最大为目标对内部分布式单元进行日前优化,并根据优化结果上报计划参与市场竞价,经调度中心进行市场出清,依据调度指令下发日前计划,各分布式单元进行日内计划执行,并在日后进行结算及零售商再选择。

上述竞价策略中,均采用最大化VPP净收益或VPP各成本之和最小作为目标函数,但在电力市场中存在多个主体,且仅考虑VPP经济性所得的最优调度方案往往无法满足配电网的安全需求,为使各类资源获得最优分配,平衡各市场主体利益以及VPP的经济性和配电网的安全性,最大化综合效益,研究者们又将博弈论的理念引入到了VPP的市场机制当中。文献[28]提出了双层优化理念,针对具备发电能力并拥有配网运营权的发电型售电公司,提出售电公司利用VPP技术辅助参与市场的双层优化调度模型和求解方法,配网层优化售电公司运营收益,VPP层使VPP经济效益最高。文献[66-68]将主从博弈应用于VPP,文献[66]认为电价竞标和电量竞标2个阶段存在主从递阶关系,建立了VPP的电价竞标模型和电量竞标模型,将Stackelberg博弈理论应用于VPP的电价竞标和电量竞标过程中。文献[67]构建了以VPP作为售电商的EV主从博弈模型,以EV充电站为充电代理实现二者的博弈均衡。文献[68]建立了运营商和多虚拟电厂的一主多从博弈模型,用以研究运营商动态定价行为和VPP能量管理,兼顾了配电网运营商和VPP的利益,并提出一种基于Kriging元模型的主从

博弈均衡算法。在主从博弈中,常用的双层目标博弈模型为

$$\max F_i = \sum_{t=1}^T [\lambda_{i,t} (\bar{P}_{i,t} - \Delta P_{i,t}) - f(\bar{P}_{i,t})], \quad (8)$$

$$\max F_{dj} = \sum_{t=1}^T [-\lambda_{dj,t} (\bar{P}_{dj,t} - \Delta P_{dj,t})], \quad (9)$$

$$\min F = F_1 + F_2 + F_3 - F_4, \quad (10)$$

式中: $F_i$ 为分布式电源*i*的效用函数; $\lambda_{i,t}$ 为VPP为分布式电源*i*制定的电价; $\bar{P}_{i,t}$ 为*t*时刻机组*i*的实时出力; $\Delta P_{i,t}$ 为*t*时刻机组*i*的弃电量; $f(\bar{P}_{i,t})$ 为*t*时刻机组*i*的发电成本; $F_{dj}$ 为负荷*j*的效用函数; $\lambda_{dj,t}$ 为负荷*j*的电价; $\bar{P}_{dj,t}$ 为*t*时刻负荷*j*的实时需求量; $\Delta P_{dj,t}$ 为*t*时刻负荷*j*的负荷调整量; $F$ 为VPP的运行成本; $F_1$ 为VPP支付给内部分布式电源和负荷的费用,可正可负,其值为正表示VPP支付费用,其值为负表示VPP获得收益; $F_2$ 为弃风弃光成本; $F_3$ 为DR成本; $F_4$ 为与配电网发生交易的收益。

式(8)与式(9)为下层模型,解决电量优化问题,式(10)为上层模型,解决电价优化问题。

文献[69–70]选取了非合作博弈,前者运用非合作博弈理论构建发电侧和用户侧的互动模型,并同时考虑用户满意度,以各自效用最大化为目标进行博弈寻优运算,在兼顾用户满意度的前提下实现用户负荷侧经济最优以及发电侧效用最优;后者提出了考虑VPP经济性和配电网安全性的非合作博弈模型,通过循环迭代求解使双方达到Nash均衡。文献[71]进一步考虑了博弈论中的合作模式,基于寡头竞争的博弈均衡理论,分别建立了风电商和EV聚合商以VPP合作模式和非合作模式参与投标竞争的电力市场多时段随机博弈均衡模型。

## 4.2 VPP的工程应用

具有代表性的VPP工程应用,主要集中于欧盟和美国。欧盟的VPP项目,主要聚焦于对分布式电源的整合与应用。2001起实施的欧盟虚拟燃料电池发电厂(Virtual Fuel Cell Power Plant, VFCPP)项目将31个分散的居民燃料电池聚合成1个有机的热电联产整体,降低了生产成本和峰值负荷<sup>[72]</sup>。2005年欧盟实施FENIX项目,采用北部和南部2个方案,聚合了大量分布式电源,使欧盟供电系统实现高性价比、安全、可持续的技术体系和商业框架<sup>[73]</sup>。2007年,荷兰研究中心提出了功率匹配器的概念,基于此实施了包含10个微型热电联产机组的VPP项目,实现了在电价的驱动下降低配电网峰值<sup>[74]</sup>。同在2007年,卡塞尔大学将德国的风力涡轮机、太阳能系统、沼气电站和水电站组成最大的VPP项目<sup>[25]</sup>。2009年丹麦的EDISON项目采用VPP技术

对电动汽车智能充放电进行管理,为大规模的EV并网提供了支撑<sup>[75]</sup>。2010年启动的欧盟WEB2ENERGY项目以VPP的形式将分布式电源与需求侧资源进行聚合,并利用智能计量技术,实现了智能能量管理和智能配电自动化<sup>[76]</sup>。文献[25]还提出2012年德国莱茵集团(RWE)开始运营第一家商用规模的虚拟电厂,采用西门子设计的能量管理系统对绿色能源设备进行组合管理,实现了稳定供电,并获得政府补贴。

与欧洲VPP项目相比,美国的VPP研究更关注DR<sup>[77]</sup>。例如,纽约ISO(NYISO)电力市场下的DR产品包括紧急DR计划、日前DR计划、有自备发电装机的特殊资源以及需求侧辅助服务计划4类;PJM电力市场下的DR分为参与PJM能量市场的DR、参与PJM容量市场的DR和参与PJM辅助服务市场的DR3类,其中第3类对检测设备要求最高;德克萨斯州电力可靠性委员会(ERCOT)的DR是一种自愿的负荷响应,参与的负荷作为一类独立资源的负荷,具有和发电机相同的遥测和调度要求,在负载之上进行能量平衡。

综合上述事例,可以总结出欧洲实行VPP主要针对分布式电源在电力系统中的配置与利用,美国的VPP更加侧重于DR,可控负荷在其中占据重要地位。

我国同美国相似,虚拟电厂的工程应用更侧重其内部灵活负荷的DR。我国的VPP项目起步较晚但发展迅速,上海市于2019年12月组织开展虚拟电厂运营项目“迎峰度冬”试点交易工作<sup>[78]</sup>,将客户用能设备进行深层连接和精准接入,实现对闲散负荷的聚合,同时通过终端移动App,实现用户对自身能耗情况的检测,进一步提升自身电力能源的精细化管理水平<sup>[78]</sup>。河北省的实践主要集中在DR方面<sup>[79]</sup>,出台了《关于大力开展电力需求侧管理的意见》,为需求侧管理项目的开展设立了专项资金,并将“十项绿色工程”作为重点工作。江苏省于2015年出台了《江苏省电力需求响应实施细则》<sup>[79]</sup>,并自2016年起,开始实施国家重点研发计划“城区用户与电网供需友好互动系统”,立足于“科学合理的机制及模型设计”和“高效便捷的用户及电网侧装备”,选取苏州环金鸡湖地区和常州武进地区为示范工程,使示范互动家庭用户综合能耗下降5.5%以上,示范区峰谷差下降5.8%以上。南方电网公司以“绿色行动”为契机,于2010年成立了南方电网综合能源有限公司,开展合同能源管理节能服务项目共115项,已建成或初步建成合同能源管理项目72项<sup>[80]</sup>。



### 4.3 VPP的研究展望

随着技术的快速提升以及新需求的不断涌现,VPP的研究也将不断深入,有待研究的热点问题主要包含以下2个方面。

首先,随着5G通信技术的进步与普及,信息传输速度愈发迅捷,应当更加关注VPP中灵活负荷的调控指令在传输时的通信延迟问题,使之与5G技术紧密结合,对调控效果实现优化。当VPP通过调节内部灵活负荷参与电力系统辅助服务时,需要减小通信延迟,提高调控速度<sup>[60]</sup>。但是,目前大部分针对灵活负荷集群控制方法的研究,其关注焦点集中在控制方法设计本身,在研究中往往将环境设定为负荷调控指令在传输时没有通信延迟,调控行为能够瞬间实现,并且假设电力系统的频率偏差可以被精确检测而没有测量误差<sup>[81-84]</sup>。在VPP的实际运行过程中,通信延迟和测量误差难以避免,这将对VPP提供辅助服务的性能产生极大影响。

其次,当VPP聚合工业用户时,其主要调控负荷多为公共能源系统中的灵活负荷,如空调等温控负荷、空气压缩机等设备。研究过程中的物理建模以及控制策略,也多是针对上述对象提出<sup>[85-87]</sup>。在工艺能源系统方面,现有研究稍显薄弱。针对工艺终端,可梳理开采、输运、使用全寿命周期内高能耗点及易于调节点,从能源活动排放、净调入电力、工业生产过程3方面展开研究,计算碳排放量及VPP的外特性参数,提出工艺终端灵活负荷的调控优化策略,实现助力“双碳”以及为电力系统提供辅助服务的效果,并结合环境经济效益提出VPP中工艺能源系统的优化调度评估模型。

## 5 结论

VPP是通过先进的通信技术,在不改变电网原有拓扑结构的基础上,将地理位置分散的分布式电源、储能系统、可控负荷等单元聚合成1个协调管理系统,依靠一系列控制手段使其参与到电力市场和电网运行当中。它的概念侧重于对外界表现出的功能与效果,其核心内容可概括为“通信”与“控制”。

VPP的控制结构分为集中控制、集中-分散控制、完全分散控制3类,在优化调度层面聚焦于3点。

(1)与电-热-冷-气等综合能源协同优化,促进能源行业安全、高效发展,缓解能源危机。

(2)与EV进行协调优化调度,降低EV大规模并网时产生的峰谷差。

(3)消纳风电、光伏等可再生能源,平抑分布式

电源发电的间歇性和随机性带来的影响,减少弃风弃光现象,提高电网运行的经济性和可靠性。除优化调度外,建立适合我国VPP发展的市场机制也非常重要,需找到适合我国VPP发展的商业模式,通过对竞价策略的研究确保VPP在市场环境下的收益,并结合博弈论使综合效益最大化。

在工程实践方面,欧洲VPP项目关注对分布式电源的聚合与控制,美国则更偏向于使用可控负荷参与DR,我国VPP项目起步较晚但发展迅速,是未来发展的重点领域。随着我国电力体制改革的推进,VPP在电力市场的发展和能源物联网的建设方面都有着更加重要的作用。

### 参考文献:

- [1]KARDAKOS E G, SIMOGLU C K, BAKIRTZIS A G. Optimal offering strategy of a virtual power plant: A stochastic bi-level approach[J].IEEE Transaction on Smart Grid,2016,7(2):794-806.
- [2]FARHANGI H.The path of the smart grid[J].IEEE Power and Energy Magazine,2010,8(1):18-28.
- [3]ZIADI Z, TAIRA S, OSHIRO M, et al. Optimal power scheduling for smart grids considering controllable loads and high penetration of photovoltaic generation [J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2014,5(5):2350-2359.
- [4]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.
- [5]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.
- [6]HILL C A, SUCH M C, CHEN D, et al. Battery energy storage for enabling integration of distributed solar power generation[J].IEEE Transaction on Smart Grid,2012,3(2): 850-857.
- [7]LEE D, KIM J, BALDICK R. Stochastic optimal control of the storage system to limit ramp rates of wind power output [J].IEEE Transaction on Smart Grid, 2013, 4(4): 2256-2265.
- [8]孔见虹,李平,黄未,等.基于分布式储能的光伏并网系统调频策略研究[J].电力电子技术,2020,54(4):80-83,96. KONG Jianhong, LI Ping, HUANG Wei, et al. Research on frequency modulation strategy of photovoltaic grid - connected system based on distributed energy storage [J]. Power Electronics,2020,54(4):80-83,96.
- [9]王海冰,王简,王承民,等.计及风险约束的虚拟电厂能量管理建模[J].中国电机工程学报,2017,37(20):5942-



- 5950.
- WANG Haibing, WANG Jian, WANG Chengmin, et al. Risk-constrained energy management modeling of virtual power plant [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(20): 5942–5950.
- [10] 刘吉臻, 李明扬, 房方, 等. 虚拟发电厂研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5103–5111.
- LIU Jizhen, LI Mingyang, FANG Fang, et al. Review on virtual power plants [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5103–5111.
- [11] 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.
- [12] 别朝红, 胡国伟, 谢海鹏, 等. 考虑需求响应的含风电电力系统的优化调度[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(13): 115–120.
- BIE Chaohong, HU Weiguo, XIE Haipeng, et al. Optimal dispatch for wind power integrated systems considering demand response [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13): 115–120.
- [13] YU R, JAN K, SONIA M. Storage size determination for grid-connected photovoltaic systems [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(1): 68–81.
- [14] 晋宏杨, 孙宏斌, 郭庆来, 等. 含大规模储热的光热电站-风电联合系统多日自调度方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(11): 17–23.
- JIN Hongyang, SUN Hongbin, GUO Qinglai, et al. Multi-day self-scheduling method for combined system of CSP plants and wind power with large-scale thermal energy storage contained [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(11): 17–23.
- [15] HOUWING M, PAPAETHYMIU G, HEIJNEN P W, et al. Balancing wind power with virtual power plants of micro-CHPs [C]//2009 IEEE Bucharest PowerTech, Bucharest, Romania, 2009.
- [16] 马腾飞, 吴俊勇, 郝亮亮, 等. 基于能源集线器的微能源网能量流建模及优化运行分析[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 179–186.
- MA Tengfei, WU Junyong, HAO Liangliang, et al. Energy flow modeling and optimal operation analysis of micro energy grid based on energy hub [J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 179–186.
- [17] 胡泽春, 宋永华, 徐智威, 等. 电动汽车接入电网的影响与作用[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 1–10.
- HU Zechun, SONG Yonghua, XU Zhiwei, et al. Impacts and utilization of electric vehicles integration into power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 1–10.
- [18] 高赐威, 张亮. 电动汽车充电对电网影响综述[J]. 电网技术, 2011, 32(5): 127–131.
- GAO Ciwei, ZHANG Liang. A survey of influence of electric vehicle charging on power grid [J]. Power System Technology, 2011, 32(5): 127–131.
- [19] 孙国强, 袁智, 耿天翔, 等. 含电动汽车的虚拟电厂鲁棒随机优化调度[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(6): 44–50, 79.
- SUN Guoqiang, YUAN Zhi, GENG Tianxiang, et al. Robust stochastic optimal dispatching of virtual power plant containing plug-in electric vehicles [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(6): 44–50, 79.
- [20] MASHHOUR E, MOGHADDAS-TAFRESHI S M. Bidding strategy of virtual power plant for participating in energy and spinning reserve markets: Part I problem formulation [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2011, 26(2): 949–956.
- [21] 梅生伟, 刘锋, 魏韩. 工程博弈论基础及电力系统应用[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 65–67.
- [22] 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.
- [23] 姜海洋, 谭忠富, 胡庆辉, 等. 用户侧虚拟电厂对发电产业节能减排影响分析[J]. 中国电力, 2010, 43(6): 37–40.
- JIANG Haiyang, TAN Zhongfu, HU Qinghui, et al. Action analysis of nominal power plants on energy saving and emission controlling of power industry [J]. Electric Power, 2010, 43(6): 37–40.
- [24] 张高, 王旭, 蒋传文, 等. 采用双层优化调度的虚拟电厂经济性分析[J]. 电网技术, 2016, 40(8): 2295–2301.
- ZHANG Gao, WANG Xu, JIANG Chuanwen, et al. Economic analysis of virtual power plants based on bi-level optimization dispatch [J]. Power System Technology, 2016, 40(8): 2295–2301.
- [25] 徐峰, 何宇俊, 李建标, 等. 考虑需求响应的虚拟电厂商业模式研究综述[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.
- [26] 夏榆杭, 刘俊勇. 基于分布式发电的虚拟发电厂研究综述[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(4): 100–106, 115.
- XIA Yuhang, LIU Junyong. Review of virtual power plant based on distributed generation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(4): 100–106, 115.
- [27] 吴威辰, 王旭, 蒋传文, 等. 计及需求侧响应的虚拟电厂运行优化研究[J]. 新能源发电控制技术, 2019, 41(2): 29–32, 94.

- WU Weichen, WANG Xu, JIANG Chuanwen, et al. Research on operation optimization of virtual power plants under consideration of demand-side response[J]. The New Energy Power Control Technology, 2019, 41(2): 29-32, 94.
- [28] 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.
- [29] 刘祚宇. 含电动汽车虚拟电厂的规划与优化调度[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [30] 周亦洲, 孙国强, 黄文进, 等. 计及电动汽车和需求响应的多类电力市场下虚拟电厂竞标模型[J]. 电网技术, 2017, 41(6): 1759-1766.
- ZHOU Yizhou, SUN Guoqiang, HUANG Wenjin, et al. Strategic bidding model for virtual power plant in different electricity markets considering electric vehicles and demand response[J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 1759-1766.
- [31] 赵洪山, 刘然. 奖惩机制下虚拟电厂优化调度效益分析[J]. 电网技术, 2017, 41(9): 2840-2846.
- ZHAO Hongshan, LIU Ran. Benefit analysis of optimal schedule of virtual power plant under reward-punishment mechanism[J]. Power System Technology, 2017, 41(9): 2840-2846.
- [32] 孙国强, 周亦洲, 卫志农, 等. 能量和旋转备用市场下虚拟电厂热电联合调度鲁棒优化模型[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(11): 3118-3128.
- SUN Guoqiang, ZHOU Yizhou, WEI Zhinong, et al. Thermal and electrical scheduling of a virtual power plant for participating in energy and spinning reserve markets based on robust optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(11): 3118-3128.
- [33] 袁桂丽, 王琳博, 王宝源. 基于虚拟电厂“热电解耦”的负荷优化调度及经济效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(17): 4974-4985.
- YUAN Guili, WANG Linbo, WANG Baoyuan. Optimal dispatch of heat-power load and economy benefit analysis based on decoupling of heat and power of virtual power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17): 4974-4985.
- [34] 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.
- [35] 周亦洲, 孙国强, 黄文进, 等. 多区域虚拟电厂综合能源协调调度优化模型[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(23): 6780-6790.
- ZHOU Yizhou, SUN Guoqiang, HUANG Wenjin, et al. Optimized multi-regional integrated energy coordinated scheduling of a virtual power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23): 6780-6790.
- [36] 许福鹿, 周任军, 曹俊波, 等. 多种市场下虚拟电厂电-热-气协调优化调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(9): 35-42.
- XU Fulu, ZHOU Renjun, CAO Junbo, et al. Coordinated optimal dispatching of power-heat-gas for virtual power plant participating in multiple markets[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(9): 35-42.
- [37] 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.
- [38] 卢志刚, 王荟敬, 赵号, 等. 含V2G的虚拟电厂双层鲁棒优化调度策略[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1245-1252.
- LU Zhigang, WANG Huijing, ZHAO Hao, et al. Strategy of bi-level inverse robust optimization dispatch of virtual power plant containing V2G[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1245-1252.
- [39] 刘永前, 林爱美, 阎洁, 等. 基于深度学习的风光场群功率预测方法研究[J]. 分布式能源, 2021, 6(2): 14-21.
- LIU Yongqian, LIN Aimei, YAN Jie, et al. Research on power forecasting method for wind farms and photovoltaic stations based on deep learning[J]. Distributed Energy, 2021, 6(2): 14-21.
- [40] 崔杨, 陈正洪, 许沛华. 基于机器学习的集群式风光一体短期功率预测技术[J]. 中国电力, 2020, 53(3): 1-7.
- CUI Yang, CHEN Zhenghong, XU Peihua. Short-term power prediction for wind farm and solar plant clusters based on machine learning method[J]. Electric Power, 2020, 53(3): 1-7.
- [41] 王函. 风光发电功率与用电负荷联合预测方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
- [42] 刘小瑞. 基于数据驱动的风电场功率预测及其在源荷协调中的应用[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2018.
- [43] 韩晓娟, 程成, 籍天明, 等. 计及电池使用寿命的混合储能系统容量优化模型[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 91-97.
- HAN Xiaojuan, CHENG Cheng, JI Tianming, et al. Capacity optimal modeling of hybrid energy storage systems considering battery life[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 91-97.
- [44] 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.
- [45] 严干贵, 冯晓东, 李军徽. 用于松弛调峰瓶颈的储能系统容量配置方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(28): 27-35.
- YAN Gangui, FENG Xiaodong, LI Junhui. Optimization of energy storage system capacity for relaxing peak load regulation bottlenecks [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(28): 27-35.
- [46] 韦立坤, 赵波, 吴红斌, 等. 虚拟电厂下计及大规模分布式光伏的储能系统配置优化模型[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(23): 66-74.
- WEI Likun, ZHAO Bo, WU Hongbin, et al. Optimal allocation model of energy storage system in virtual power plant environment with a high penetration of distributed photovoltaic generation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23): 66-74.
- [47] 牛东晓, 赵东来, 杨尚东, 等. 考虑不确定性和储能系统的虚拟电厂与能效电厂联合调度优化模型及仿真应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(7): 1736-1743.
- NIU Dongxiao, ZHAO Donglai, YANG Shangdong, et al. Cooperative scheduling optimization model and simulation application for virtual power plant and efficiency power plant considering uncertainty and energy storage system [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(7): 1736-1743.
- [48] 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.
- [49] 吕梦璇, 娄素华, 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.
- LÜ 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.
- [50] 陈厚合, 王子璇, 张儒峰, 等. 含虚拟电厂的风电并网系统分布式优化调度建模[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9): 2615-2624.
- CHEN Houhe, WANG Zixuan, ZHANG Rufeng, et al. Decentralized optimal dispatching modeling for wind power integrated power system with virtual power plant [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2615-2624.
- [51] 徐辉, 焦扬, 蒲雷, 等. 计及不确定性和需求响应的风光燃储集成虚拟电厂随机调度优化模型[J]. 电网技术, 2017, 41(11): 3590-3597.
- XU Hui, JIAO Yang, PU Lei, et al. Stochastic scheduling optimization model for virtual power plant of integrated wind-photovoltaic-energy storage system considering uncertainty and demand response [J]. Power System Technology, 2017, 41(11): 3590-3597.
- [52] 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-EPSC, 2020, 32(4): 21-28.
- [53] 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-EPSC, 2020, 32(10): 90-96.
- [54] 吕蒙. 考虑风光不确定性的微网多时间尺度优化调度[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
- [55] 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.
- [56] 魏向欣, 何涛, 李一航, 等. 5G网络切片承载电力系统业务的时延特性研究[J]. 电力信息与通信技术, 2019, 17(8): 7-12.
- WEI Xiangxin, HE Tao, LI Yihang, et al. Research on time delay characteristics of 5G network slice in carrying power communication service [J]. Electric Power ICT, 2019, 17(8): 7-12.
- [57] 张放, 程林, 黎雄, 等. 广域闭环控制系统时延的测量及建模(一): 通信时延及操作时延[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(22): 5768-5777.
- ZHANG Fang, CHENG Lin, LI Xiong, et al. Delay measurement and modeling in a wide-area closed-loop control system, Part I: Communication delay and operational delay [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(22): 5768-5777.
- [58] 张放, 程林, 黎雄, 等. 广域闭环控制系统时延的测量及建模(二): 闭环时延[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35



- (23):5995-6002.
- ZHANG Fang, CHENG Lin, LI Xiong, et al. Delay measurement and modeling in a wide-area closed-loop control system, Part II: Closed-loop delay [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(23):5995-6002.
- [59] 张放, 程林, 黎雄, 等. 广域闭环控制系统时延的分层预测补偿[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(19):3194-3201.
- ZHANG Fang, CHENG Lin, LI Xiong, et al. Prediction based on hierarchical compensation for delays of wide-area closed-loop control systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(19):3194-3201.
- [60] 惠红勋. 温控负荷参与电力系统动态响应的建模与控制方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [61] 刘扬洋, 蒋传文, 谭胜敏, 等. 考虑风险调整资本收益率阈值约束的虚拟电厂优化调度策略[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(17):4617-4626.
- LIU Yangyang, JIANG Chuanwen, TAN Shengmin, et al. Optimal dispatch of virtual power plant considering risk adjusted return on capital constraints [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(17):4617-4626.
- [62] 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.
- [63] 杨甲甲, 赵俊华, 文福拴, 等. 含电动汽车和风电机组的虚拟发电厂竞价策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(13):92-102.
- YANG Jiajia, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. Development of bidding strategies for virtual power plants considering uncertain outputs from plug-in electric vehicles and wind generators [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13):92-102.
- [64] 邵炜晖, 许维胜, 徐志宇, 等. 基于虚拟电厂技术的未来智能电网用户并网规则设计及仿真[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(17):140-146.
- SHAO Weihui, XU Weisheng, XU Zhiyu, et al. Design and simulation of grid connection mechanism for future smart grid users based on virtual power plant technology [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17):140-146.
- [65] 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.
- [66] 方燕琼, 甘霖, 艾芊, 等. 基于主从博弈的虚拟电厂双层竞标策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(14):61-69.
- FANG Yanqiong, GAN Lin, AI Qian, et al. Stackelberg game based bi-level bidding strategy for virtual power plant [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(14):61-69.
- [67] 张高, 王旭, 蒋传文. 基于主从博弈的含电动汽车虚拟电厂协调调度[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(11):48-55.
- ZHANG Gao, WANG Xu, JIANG Chuanwen. Stackelberg game based coordinated dispatch of virtual power plant considering electric vehicle management [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(11):48-55.
- [68] 董雷, 涂淑琴, 李烨, 等. 基于元模型优化算法的主从博弈多虚拟电厂动态定价和能量管理[J]. 电网技术, 2020, 44(3):973-983.
- DONG Lei, TU Shuqin, LI Ye, et al. A stackelberg game model for dynamic pricing and energy management of multiple virtual power plants using metamodel-based optimization method [J]. Power System Technology, 2020, 44(3):973-983.
- [69] 路尧, 刘继春, 许立雄. 非合作博弈下考虑用户满意度的虚拟电厂经济优化运行[J]. 分布式能源, 2017, 2(1):23-29.
- LU Yao, LIU Jichun, XU Lixiong. Economic optimization operation of virtual power plant considering the users' satisfaction based on non-cooperative game theory [J]. Distributed Energy, 2017, 2(1):23-29.
- [70] 孙国强, 钱苇航, 黄文进, 等. 考虑配电网安全性的虚拟电厂优化调度博弈模型[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(5):7-14.
- SUN Guoqiang, QIAN Weihang, HUANG Wenjin, et al. Optimal dispatch game model for virtual power plant considering security of distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(5):7-14.
- [71] 王晔, 张华君, 张少华. 风电和电动汽车组成虚拟电厂参与电力市场的博弈模型[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(3):155-162.
- WANG Xian, ZHANG Huajun, ZHANG Shaohua. Game model of electricity market involving virtual power plant composed of wind power and electric vehicles [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(3):155-162.
- [72] SOTER S, BERTLING F. Adjustable converter for injection of fuel cell power as a part of a virtual power plant [C]// IEEE 35th Annual Power Electronic Specialists Conference, Aachen, Germany, 2004.
- [73] 卫志农, 余爽, 孙国强, 等. 虚拟电厂欧洲研究项目述评[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(21):196-202.
- WEI Zhinong, YU Shuang, SUN Guoqiang, et al. Review on European research project of virtual power plant [J].

- Automation of Electric Power Systems, 2013, 37 (21) : 196-202.
- [74] KOK K J, WARMER J C, KAMPHUIS G I. The power matcher: Multi-agent control of electricity demand and supply[J]. IEEE Intelligent System, 2006, 21(2): 89-90.
- [75] BINDING C, GANTENBEIN D, JANSEN B, et al. Electric vehicle fleet integration in the Danish Edison project—A virtual power plant on the island of Bornholm [C]//IEEE PES General Meeting, Minneapolis, MN, USA, 2010.
- [76] FENN B, HOPP O, AHNER M. Advanced technologies of demand side integration by VPPs and through smart metering in households - experiences from a lighthouse project [C]//CIGRE 2012, Paris, France, 2012.
- [77] 阮文俊, 刘莎, 李扬. 美国需求响应综述[J]. 电力需求侧管理, 2013, 15(2): 61-64.
- RUAN Wenjun, LIU Sha, LI Yang. Overview of demand response in the USA[J]. Power Demand Side Management, 2013, 15(2): 61-64.
- [78] 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.
- [79] 谢康, 张凯杰, 栾开宁, 等. 电力体制改革背景下的需求响应积分方案探索[J]. 电力需求侧管理, 2019, 21(3): 7-10.
- XIE Kang, ZHANG Kaijie, LUAN Kaining, et al. Exploration of demand response score scheme under the background of electric power system reform [J]. Power Demand Side Management, 2019, 21(3): 7-10.
- [80] 张勉荣. 中国南方电网公司的电力需求侧管理实践[J]. 电力需求侧管理, 2011, 13(1): 7-8.
- ZHANG Mianrong. DSM practice of China Southern Power Grid [J]. Power Demand Side Management, 2011, 13(1): 7-8.
- [81] 邓宇鑫, 王磊, 李扬, 等. 温控负荷直接负荷控制策略与优化调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(6): 18-25.
- DENG Yuxin, WANG Lei, LI Yang, et al. Direct load control strategies and optimization scheduling of thermostatically controlled loads [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(6): 18-25.
- [82] 戚野白, 王丹, 贾宏杰, 等. 基于需求响应的集群温控负
- 荷建模及参与低频减载策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(3): 99-108.
- QI Yebai, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Research on under frequency load shedding strategy using aggregated thermostatically controlled loads based on demand response [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(3): 99-108.
- [83] 刘林鹏, 陈嘉俊, 朱建全, 等. 风储联合参与电能量与快速调频市场的优化投标策略[J]. 华电技术, 2021, 43(9): 46-53.
- LIU Linpeng, CHEN Jiajun, ZHU Jianquan, et al. Optimization bidding strategy for wind power and energy storage participating in energy market [J]. Huadian Technology, 2021, 43(9): 46-53.
- [84] 姚垚, 张沛超, 王永权. 温控负荷参与快速频率调整的双层控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(17): 4987-4998, 5296.
- YAO Yao, ZHANG Peichao, WANG Yongquan. A two-layer control method for thermostatically controlled loads to provide fast frequency regulation [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(17): 4987-4998, 5296.
- [85] 张青. 温控负荷聚合建模及其功率控制[D]. 南京: 东南大学, 2016.
- [86] 王兴兴, 孙建桥, 陈明. 储能火电联合调频系统设计与研究[J]. 华电技术, 2020, 42(4): 72-76.
- WANG Xingxing, SUN Jianqiao, CHEN Ming. Design and research on energy storage and thermal power combined frequency modulation systems [J]. Huadian Technology, 2020, 42(4): 72-76.
- [87] 彭维珂, 聂椿明, 陈衡, 等. 基于智能算法的空冷火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.

(本文责编: 张帆)

#### 作者简介:

张凯杰(1996), 男, 助理工程师, 工学硕士, 从事虚拟电厂、电力市场以及需求响应技术研究工作, 2089225187@qq.com;

丁国锋\*(1982), 男, 高级工程师, 从事虚拟电厂、需求响应以及电力计量技术研究工作, 20933791@qq.com。

\*为通信作者。