

# 面向多虚拟电厂的分层分区多层互补 动态聚合调控策略

张叶青<sup>1</sup>, 陈文彬<sup>1</sup>, 徐律军<sup>1</sup>, 江兴稳<sup>2\*</sup>

(1. 国网上海市电力公司, 上海市 浦东新区 200122;

2. 上海电力大学数理学院, 上海市 浦东新区 201306)

## Multi-Virtual Power Plant-Oriented Dynamic Aggregation Control Strategy Based on Hierarchical Partition and Multi-Layer Complementation

ZHANG Yeqing<sup>1</sup>, CHEN Wenbin<sup>1</sup>, XU Lüjun<sup>1</sup>, JIANG Xingwen<sup>2\*</sup>

(1. State Grid Shanghai Electric Power Company, Pudong New Area, Shanghai 200122, China;

2. Shanghai University of Electric Power, College of Mathematics and Physics, Pudong New Area, Shanghai 201306, China)

**摘要:** 虚拟电厂(virtual power plant, VPP)是一种新型运行模式, 通过有效聚合电网中大量需求侧资源并制定有效的动态聚合调控策略, 实现电网不同时空的功率互补, 提高电网调控的灵活性和系统的经济性。从电网调度角度分析了典型电网需求响应行为特性, 提出了需求响应能力指标和虚拟电厂分类聚合方法, 构建了多源虚拟电厂调控模型, 以其结果支撑虚拟电厂响应资源的分层分区互补调控。最后, 以某园区为案例, 分析了虚拟电厂调控策略的合理性和多源虚拟电厂调控的科学性。结果表明, 整体动态调控策略可以引导虚拟电厂科学合理地发挥需求响应价值, 促进电网负荷平稳和系统安全稳定运行。

**关键词:** 虚拟电厂(VPP); 动态聚合; 电网调度; 需求侧管理

**ABSTRACT:** Virtual power plant (VPP) is a new type of operation mode. It can effectively aggregate a large number of demand side resources and formulate effective dynamic aggregate control strategies to achieve power complementation in different time and space of the power grid and improve the flexibility of power grid control and the economy of the system. From the perspective of power grid dispatching, this paper analyzed the characteristics of typical power grid demand response behavior, and proposed the demand response capability indexes and the classification and aggregation method of VPP. Then, a multi-source VPP

regulation model was constructed, and the results supported the hierarchical and regional complementary regulation of VPP response resources. Finally, taking a park as a case, the rationality of VPP control strategy and the scientificity of multi-source VPP control were analyzed. The results show that the overall dynamic control strategy can guide the VPP to give full play to the demand response value in a scientific and reasonable way, and promote the stable load of power grid and the safe and stable operation of the system.

**KEY WORDS:** virtual power plant (VPP); dynamic aggregation; power grid dispatching; demand side management

## 0 引言

2020年9月22日, 国家主席习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上宣布, 中国将提高国家自主贡献力度, 采取更加有力的政策和措施, 二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值, 努力争取2060年前实现碳中和。2021年3月1日, 国家电网有限公司发布“碳达峰、碳中和”行动方案, 提出在能源消费侧全面推进电气化和节能提效。随着中国电力改革的逐步深入, 中国的电力市场开始从单一的发电侧市场向双边市场进行转变<sup>[1-2]</sup>。虚拟电厂(virtual power plant, VPP)作为一种新型运行模式, 能够有效聚合电网中分布式电源、柔性负荷以及储能(energy storage, ES)设施等资源,

基金项目: 国家电网公司科技项目(52090022004A)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (52090022004A).

从而可以提高电网运营效率和服务水平<sup>[3-5]</sup>。

虚拟电厂将众多可调节资源聚合起来,整体对外参与电网统一调度,充分利用分布式资源的协调互补性,实现资源的合理优化配置及利用<sup>[6-9]</sup>。虚拟电厂对外作为一个特殊的发电厂运行,呈现传统发电厂的整体功能与效果,可像传统发电厂一样对其进行控制管理,包括向电网提交发电计划、参与电力市场交易及调峰调频等辅助服务<sup>[10]</sup>;对内作为一个综合的能源管理系统,拥有自我协调、自我管理、自我控制等多重功能。虚拟电厂可将大量中小型可控负荷聚合成独立主体参与需求响应,在电网日前调度和实时调度中发挥积极作用<sup>[11-12]</sup>。

与国外相比,我国虚拟电厂的研究起步较晚<sup>[13]</sup>。目前,在国内已形成具有一定规模的特殊集成性电厂参与电网调度或电力交易,为分布式资源的统一管理提供了有效途径。结合我国电网特点和各地区负荷特性,针对虚拟电厂,研究者开展了相关研究,如:基于可控负荷响应性能差异的虚拟电厂分类聚合方法<sup>[14]</sup>,计及用户分级的虚拟电厂经济调度<sup>[15]</sup>,温控负荷虚拟电厂建模过程<sup>[16]</sup>,电动汽车(electric vehicles, EVs)虚拟电厂的多时间尺度响应能力评估模型<sup>[17]</sup>,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<sup>[18]</sup>,基于精细化需求响应的虚拟电厂优化调度<sup>[19]</sup>,多时间尺度的多虚拟电厂双层协调机制与运行策略<sup>[20-21]</sup>,储能系统协同调度策略<sup>[22]</sup>,以及柔性负荷<sup>[23]</sup>、可调节负荷<sup>[24]</sup>等。然而,由于用户侧存在弹性能力弱、调节能力不足等问题,为真正实现需求侧响应的目标,使虚拟电厂成为新型电力系统的重要组成部分,仍有很多技术难题亟需解决,如:含多种发电资源的虚拟电厂联合模型,以及多时空尺度需求响应能力难以准确感知与评价;如何基于虚拟电厂交易需求和匹配规则,充分挖掘用户侧的调节潜力并对其进行聚合和调控;如何实现虚拟电厂与传统能源、新能源、分布式能源等多种发电资源的协调互补运行,形成多元多层互补供电架构。

本文借鉴国内外已有经验,挖掘和梳理虚拟电厂响应资源,分析各类虚拟电厂资源的响应特

性及其在电网调控中的应用潜能。在构建需求响应能力指标和多源虚拟分层分区调控模型的基础上,探究虚拟电厂在削峰与改善负荷曲线等场景的应用和调控策略,从而引导各类电力市场主体挖掘可用资源,主动参与需求响应,加快推进需求侧可调控资源的建设,促进新能源消纳和提高电力系统调节能力。

## 1 需求响应行为特性

研究分析负荷响应特性,把握需求侧资源特性与其影响因素间的关系,探索负荷特性内在变化规律与发展趋势,可为制定需求响应能力指标和虚拟电厂动态聚合提供科学依据和支撑。电网负荷和虚拟电厂典型响应资源具体如下。

### 1.1 可调负荷

在众多可调节负荷中,温控负荷是一种较为典型的代表,以电热泵、电空调、电冰箱、电热水器设备为代表的家居型需求响应可作为负荷调控的研究重点,其他温控设备原理类似。以一天内温控负荷所在室内温度为状态变量,温度的变化<sup>[16]</sup>表示如下:

$$\begin{aligned} \theta_{t+\Delta t}^L = & [\theta_t^{\text{out}} + (\theta_t^L - \theta_t^{\text{out}})e^{\Delta t/(RC)}] - P_t^L [1 - e^{\Delta t/(RC)}] / \\ & (\overline{T}^L - \underline{T}^L) [\theta_t^{\text{out}} + (\theta_t^L - \theta_t^{\text{out}})e^{\Delta t/(RC)}] + \\ & P_t^L [e^{\Delta t/(RC)} - 1] / (\overline{T}^L - \underline{T}^L) \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $\theta_t^L$  为  $t$  时刻电热泵所在室内的环境温度;  $\theta_t^{\text{out}}$  为室外温度;  $R$ 、 $C$  分别为电热泵的等值热电阻、等值热电容;  $P_t^L$  为电热泵与电网交换的有功功率,以向电网反馈电能为正方向,其取值集合为  $\{ \underline{T}_t^L, \overline{T}_t^L \}$ , 其中  $\overline{T}_t^L$  和  $\underline{T}_t^L$  分别为  $P_t^L$  的上、下界。为保证用户用能舒适度,通常设定室内温度上下限  $\theta_{\text{upper}}$ 、 $\theta_{\text{lower}}$ ; 在温控负荷开启升温时段,由于开启时间较短,不宜参与控制; 在室温到达设定可控温度时,可通过关断温控负荷参与系统响应; 当室温降到某个可控低温时,可通过开启温控负荷参与系统响应。

### 1.2 电动汽车

电动汽车具有与电网的双向互动特性<sup>[25]</sup>。文献[26]从虚拟电厂商的角度,提出基于分时电价和碳配额双重激励含电动汽车的虚拟电厂优化调度模型,虚拟电厂作为激励政策的制定者处于主

体地位，电动汽车作为激励政策的接受者处于从体地位，通过引入等效负荷概念，并根据等效负荷制定双重激励政策，引导电动汽车峰时放电、谷时充电；该模型可提高虚拟电厂和电动汽车的总体收益，同时可避免新的峰谷差出现。

独立电动汽车在入网过程中的响应特性参考文献[16]，处于响应特性可控区域内的电动汽车，可通过调整与电网交换功率的大小参与系统需求响应。以向电网反供电为正方向<sup>[16]</sup>，即

$$\begin{cases} \overline{P}_t = P_0, \underline{P}_t = -P_0, t \in [t_s, t_d] \\ \overline{P}_t = 0, \underline{P}_t = 0, t \notin [t_s, t_d] \end{cases} \quad (2)$$

式中： $P_t$ 为 $t$ 时刻入网电动汽车的有功功率，其最大值为 $\overline{P}_t$ ，最小值为 $\underline{P}_t$ ； $P_0$ 为电动汽车入网时电池电量或车主设定的可释放电池电量。

电动汽车还存在跨区域电网交换功率问题，可通过大数据和概率分布抽样获取或预测各虚拟电厂中电动汽车的需求响应特性。

### 1.3 储能装置

储能装置具有灵活的特性，可以实现快速充放电，以跟踪电网分布式新能源出力时序，可以平抑新能源发电的波动性，快速响应电网调度(调频/调峰)信号，为电网提供优质辅助服务。但目前储能装置安装和使用成本还比较高，不宜频繁充放电，其运行成本为充放电带来的电池损耗，可表示为

$$C_{ES} = \sum_{i=1}^{N_{ES}} \sum_{t=1}^T \rho_{loss} |Q_{i,t}| \Delta t \quad (3)$$

式中： $N_{ES}$ 为储能装置数量； $T$ 为总时长； $\rho_{loss}$ 为单位电量交换对应的电池损耗系数； $Q_{i,t}$ 为第 $i$ 台储能装置在时段 $t$ 与电网之间的电能交换功率，正值代表放电，负值代表充电。

## 2 虚拟电厂动态聚合调控策略

### 2.1 需求响应能力指标

传统的电网用户侧以消耗能源的负荷为主。随着新能源的发展以及各种智能设备的普及，大量分布式能源参与电网功率交换，可中断负荷及双向调节负荷的体量与占比越来越大。这些需求侧资源具有调节电网负荷曲线峰谷的能力，然而，

无序的需求侧资源接入不能发挥其应有的价值。

由于需求侧不同类型资源具有不同响应能力，而且不同虚拟电厂拥有不同类型和不同容量的需求侧资源，在电网中发挥的价值不尽相同。为此，根据需求响应行为特性分析，选择如下指标评价各虚拟电厂的响应能力。

1) 可调容量：指虚拟电厂对电网负荷的最大可调节能力，反映的是该负荷聚集商的容量等级。

2) 可调弹性：指虚拟电厂对电网高峰负荷削峰与低谷负荷填谷时的实际可调能力，反映了需求侧资源的响应潜力。

3) 响应速度：指虚拟电厂对电网负荷削峰与填谷的响应快慢，反映了需求侧资源参与日前或即时调度潜力。

4) 时间弹性：反映虚拟电厂对电网负荷削峰与填谷响应时间上的调节弹性。

### 2.2 虚拟电厂分类聚合

作为电网调度与需求侧资源之间的桥梁，虚拟电厂需要聚合需求侧资源的响应特性，然后参与电力市场或电网调度。文献[27]从经济性和技术性2个角度出发，分析虚拟电厂中分布式能源的运行特性聚合难点，并依据功能特征的不同，将虚拟电厂分为技术型虚拟电厂和商业型虚拟电厂。技术型虚拟电厂的功能特征是为电网管理提供电压控制、调峰调频、阻塞管理等辅助服务，主要考虑分布式能源聚合对本地电网的实时影响，一般其所管辖的分布式能源地理位置分布集中。而商业型虚拟电厂的功能特征主要是制定最优购/售电计划，通过参与电力市场竞标获取收益，不考虑对电网安全稳定运行的影响，所管辖的分布式能源地理位置分布广泛。

无论是技术型虚拟电厂还是商业型虚拟电厂，在对分布式能源进行聚合时都会面对以下问题：

1) 虚拟电厂通常由多种类型分布式能源和可调资源组成，它们的运行特性在时空上存在较大差异；  
2) 分布式能源和可调负荷的聚合过程涉及诸多非线性动态约束，其聚合都不会是对分布式能源和可调负荷按时序简单叠加。不管是何种类型或包含何种资源的虚拟电厂，从电网调度的角度，需要依据各虚拟电厂的响应能力对其进行分类，

依据时空分布和需求响应能力,对相应区域内的虚拟电厂进行聚类分析和动态聚合,以满足电网调度的需求。

### 2.3 多源虚拟分层分区调控

#### 2.3.1 多需求资源分层分区

电网中虚拟电厂资源有多种,虚拟电厂内部资源聚集方式不同,不同资源的响应特性也各不相同。有些响应资源是季节性的,季节不同,响应能力不同;有些响应资源是生产性的,生产需求不同,响应能力也不同;有些响应资源是跨越不同时空区域的。因此,需求资源指标具有时空动态变化特性。不同时空特性响应资源聚集的虚拟电厂对电网也呈现不同的响应特性,并在不同时空上对区域电网产生影响。

本文探索性地开展多虚拟电厂资源的分层分区调控研究。首先根据时空信息对区域内虚拟电厂资源的需求响应能力进行指标分析,在空间尺度上根据物理位置特性和区域电网调度需求进行分区,在时间尺度上考虑电网负荷和虚拟电厂资源响应能力进行分层,可调容量大、可调弹性高、响应速度快、经济性好的响应资源具有较高分层和优先调控,并给予经济激励措施(调峰补偿或售电收益)。分层分区调控是一个动态聚合过程,目的是避免资源无序响应,引导虚拟电厂合理科学发挥需求响应价值,促进电网负荷平稳和系统安全稳定运行。

#### 2.3.2 动态调控策略

对于一个拥有若干虚拟电厂的区域电网,技术型虚拟电厂的收益主要来源于电网的调峰调频补偿收益,商业型虚拟电厂的收益主要来源于向市场售电收益以及为内部负荷供电收益。以虚拟电厂按照日前调度安排为电网提供固定出力为例,为了兼顾日前调度计划以及自身收益,虚拟电厂在保证服从调度安排的情况下,根据其自身利益进行聚集和优化,最大化其利益。聚合后的虚拟电厂按照日前调度安排向电网提供稳定出力,并以日前市场中的实时电价获取收益。

电网对虚拟电厂聚合调控的目标是以尽可能小的调控成本降低系统峰谷差。假设区域电网中有 $N$ 个虚拟电厂参与系统调控,每个虚拟电厂具

有不同的需求侧资源,虚拟电厂对内部资源聚合后,对电网呈现具有调节能力的负荷机组作用。

系统峰谷差和系统调控成本分别用函数 $F_1$ 和 $F_2$ 衡量:

$$\min F_1 = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (L_t - Q_{i,t}^{\text{VPP}} - L_{\text{avg}})^2 \quad (4)$$

$$L_{\text{avg}} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (L_t - Q_{i,t}^{\text{VPP}}) \quad (5)$$

$$\min F_2 = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T Q_{i,t}^{\text{VPP}} C_p \quad (6)$$

$$C_p = \begin{cases} 0.5, & t \in [0, 6] \cup [22, 24] \\ 1.0, & t \in [6, 22] \end{cases} \quad (7)$$

式中: $L_t$ 为时段 $t$ 负荷; $L_{\text{avg}}$ 为日均负荷; $Q_{i,t}^{\text{VPP}}$ 为第 $i$ 个虚拟电厂在时段 $t$ 与电网交换的电量,正值表示向电网供电,负值表示从电网吸收电量; $C_p$ 为峰谷电价系数。

## 3 案例分析

上海市人口聚集,属于电力负荷密集区域,但外来电比例高,本地资源禀赋不足。随着极端性天气出现的概率变大,电力系统呈现明显的双峰特征,而且具有尖峰负荷的持续时间短暂、负荷峰谷差逐年拉大的特点。随着物联网、信息通信等技术的普及,商业楼宇、电动汽车、分布式能源、5G基站等用户灵活资源快速发展,可调控资源十分丰富,虚拟电厂发展潜力巨大。“十四五”规划要求进一步全面提高资源利用效率,强化重点用能单位节能管理,实施能量系统优化。为充分发挥资源优势,开展虚拟电厂项目研究,聚焦需求响应资源,引导电力用户的用能需求具有重要的现实意义。

以某园区为案例,依据调控模型分析虚拟电厂调控策略的合理性和应用价值。图1为某园区典型日负荷和分布式光伏能源曲线。可以看出,园区负荷具有明显的双峰特征,区域内分布式光伏能源在白天具有良好的出力。然而,即使在充分运用分布式光伏能源的前提下,区域电网剩余负荷也具有很大的峰谷差和波动性。若能发挥虚拟电厂优势,调动区域内需求响应资源,引导电力用户的用能需求,则可降低电网负荷波动性,提高电能质量,降低电网调峰和调频成本。

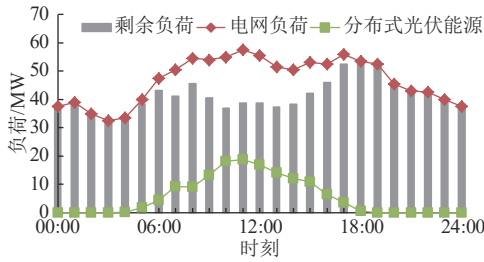


图1 某园区典型日负荷和分布式光伏能源曲线

Fig.1 Typical daily load and distributed photovoltaic energy curves of a park

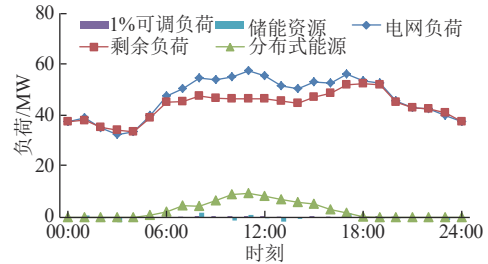
假设区域内多个虚拟电厂拥有不同的响应资源，响应成本也各不相同。但从电网调度角度，根据虚拟电厂响应能力评估，响应成本低的虚拟电厂将优先得到利用。随着各虚拟电厂间的竞争和对响应资源的调整，最终将实现响应成本均等化。因此，本文中暂不讨论拥有不同资源的虚拟电厂情形，而仅从电网调度运行角度研究不同比率需求响应资源对电网运行的影响。

图2显示了在区域虚拟电厂含有总计2 MW 储能资源(包含电动汽车)和几种不同可调负荷比率(相对电网负荷)时的调控结果。可以看出，分布式能源在调控时得到充分利用，在储能资源有限的情况下，当可调负荷比率较低时，对总负荷曲线的调度力度有限；当加大可调负荷比率时，可以起到很好的高峰负荷调节作用。由此说明，在虚拟电厂调控时，需要充分引导可调负荷参与虚拟电厂建设。

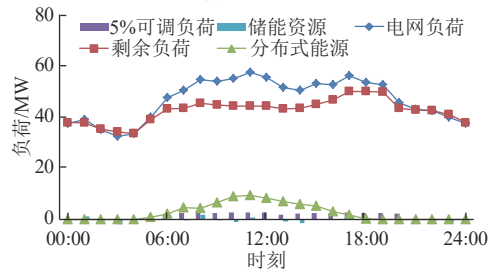
图3显示了在区域虚拟电厂含有总计4 MW 储能资源(包含电动汽车)和几种不同可调负荷比率时的调控结果。可以看出，在充分利用分布式能源的前提下，当虚拟电厂中储能资源加大时，在可调负荷比率较小时也能具有不错的调峰能力。随着可调负荷比率的提高，负荷曲线的峰谷调节能力进一步增大。

通过对比图2、3可以看出，储能资源和可调负荷都是虚拟电厂中的重要资源，加大储能资源并引导可调负荷参与系统调控，可优化资源利用，促进新能源消纳，提高电力系统调节能力。然而，储能资源和可调负荷的调节均需相应成本。因此，基于本文虚拟电厂调控策略的结果，依据需求响应能力评估和虚拟电厂的分类聚合，可有选择地

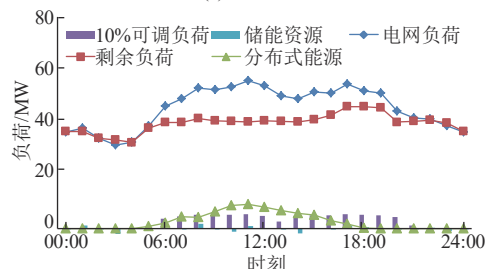
调控资源优势明显、成本低廉的虚拟电厂资源参与系统调控，从而达到分区调控和优化资源的目的。



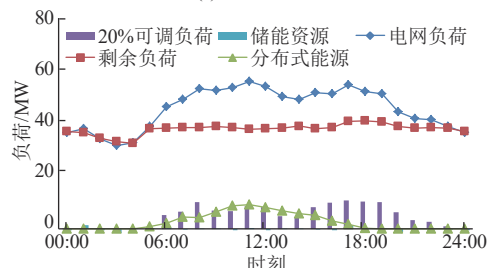
(a) 1%可调负荷



(b) 5%可调负荷



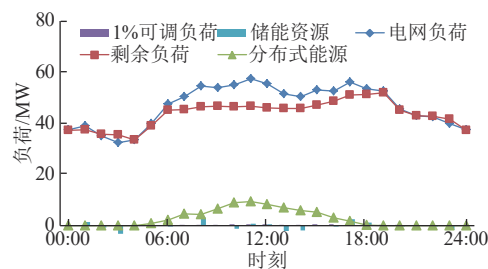
(c) 10%可调负荷



(d) 20%可调负荷

图2 2 MW 储能资源(包含电动汽车)不同比率可调负荷时的调控结果

Fig.2 Regulation results of 2 MW ES resources (including EVs) with adjustable load at different ratios



(a) 1%可调负荷

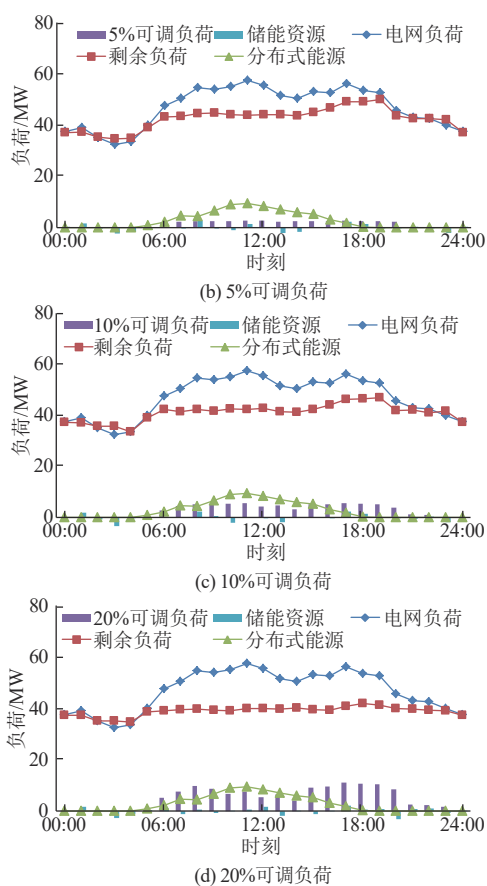


图3 4 MW 储能资源(包含电动汽车)不同比率可调负荷时的调控结果

Fig. 3 Regulation results of 4 MW ES resources (including EVs) with adjustable load at different ratios

## 4 结论

针对多虚拟电厂调控问题,从电网调度角度构建了分层分区动态调控模型和策略,以某园区为案例,分析了虚拟电厂中储能资源和可调负荷的调控策略,得到如下结论:

1) 加大储能资源并引导可调负荷参与系统调控,可提高电力系统调节能力。在储能资源有限的情况下,需要充分引导可调负荷参与虚拟电厂建设。

2) 根据资源特性不同,分层分区选择优势明显、成本低廉的资源参与系统调控,可更好地发挥虚拟电厂需求响应价值。

## 参考文献

[1] 陈好, 卫志农, 胥峥, 等. 电力体制改革下的多虚拟电厂联合优化调度策略[J]. 电力系统自动化, 2019,

43(7): 42-49.

CHEN Y, WEI Z N, XU Z, et al. Optimal scheduling strategy of multiple virtual power plants under electricity market reform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(7): 42-49.

[2] 江岳文, 陈巍. 电-碳-配额制耦合交易综述与展望[J]. 电力建设, 2023, 44(12): 1-13.

JIANG Y W, CHEN W. Review and prospect of coupled electricity-carbon-renewable portfolios trading [J]. Electric Power Construction, 2023, 44(12): 1-13.

[3] 刘亚鑫, 蔺红. 计及碳交易与条件风险值的虚拟电厂竞价策略[J]. 电力工程技术, 2023, 42(6): 179-188.

LIU Y X, LIN H. Bidding strategy of virtual power plant considering carbon trading and conditional value at risk[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(6): 179-188.

[4] 丁建顺, 尤佳, 周永刚, 等. 考虑需求响应和风险规避的虚拟电厂最优调度[J]. 智慧电力, 2023, 51(3): 79-86.

DING J S, YOU J, ZHOU Y G, et al. Optimal scheduling of virtual power plants considering demand response and risk aversion[J]. Smart Power, 2023, 51(3): 79-86.

[5] 吴晓刚, 唐家俊, 吴新华, 等. “双碳”目标下虚拟电厂关键技术与建设现状[J]. 浙江电力, 2022, 41(10): 64-71.

WU X G, TANG J J, WU X H, et al. Key technologies and present situation of virtual power plant under “dual-carbon” goals[J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(10): 64-71.

[6] 刘向向, 张森林, 朱思乔, 等. 基于灰靶理论和谱聚类的虚拟电厂多形态柔性资源聚合模型[J]. 中国电力, 2023, 56(11): 104-112.

LIU X X, ZHANG S L, ZHU S Q, et al. Multi-form flexible resource aggregation model for virtual power plant based on grey target theory and spectral clustering [J]. Electric Power, 2023, 56(11): 104-112.

[7] 闫鹏, 曾四鸣, 李铁成, 等. 基于改进量子遗传算法的虚拟电厂在多时间尺度下参与 AGC 优化调度[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(3): 23-32.

YAN P, ZENG S M, LI T C, et al. Optimal scheduling of virtual power plant participating in AGC based on improved quantum genetic algorithm on multi-time scale[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(3): 23-32.

[8] 杨秀, 杜楠楠, 孙改平, 等. 考虑需求响应的虚拟电厂双层优化调度[J]. 电力科学与技术学报, 2022,

- 37(2): 137-146.
- YANG X, DU N N, SUN G P, et al. Bi-level optimization dispatch of virtual power plants considering the demand response[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2022, 37(2): 137-146.
- [9] 宣文博, 李慧, 刘忠义, 等. 一种基于虚拟电厂技术的城市可再生能源消纳能力提升方法[J]. *发电技术*, 2021, 42(3): 289-296.
- XUAN W B, LI H, LIU Z Y, et al. A method for improving the accommodating capability of urban renewable energy based on virtual power plant technology[J]. *Power Generation Technology*, 2021, 42(3): 289-296.
- [10] 李淑静, 谭清坤, 张煜, 等. 虚拟电厂关键技术及参与电力市场模式设计研究[J]. *电测与仪表*, 2022, 59(12): 33-40.
- LI S J, TAN Q K, ZHANG Y, et al. Research on technologies of virtual power plant and its participation in power market modl design[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2022, 59(12): 33-40.
- [11] ROUZBAHANI H M, KARIMIPOUR H, LEI L. A review on virtual power plant for energy management [J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2021, 47: 101370-101385.
- [12] MICHAEL N E, HASAN S, AL-DURRA A, et al. Economic scheduling of virtual power plant in day-ahead and real-time markets considering uncertainties in electrical parameters[J]. *Energy Reports*, 2023, 9: 3837-3850.
- [13] 刘淳, 王仕俊, 赵燕玲, 等. 区块链技术在虚拟电厂交易中的应用综述[J]. *电力建设*, 2023, 44(4): 130-144.
- LIU C, WANG S J, ZHAO Y L, et al. Review of the application of blockchain technology in virtual power plant transactions[J]. *Electric Power Construction*, 2023, 44(4): 130-144.
- [14] 关舒丰, 王旭, 蒋传文, 等. 基于可控负荷响应性能差异的虚拟电厂分类聚合方法及辅助服务市场投标策略研究[J]. *电网技术*, 2022, 46(3): 933-944.
- GUAN S F, WANG X, JIANG C W, et al. Classification and aggregation of controllable loads based on different responses and optimal bidding strategy of VPP in ancillary market[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(3): 933-944.
- [15] 李英量, 周丽雯, 王德明, 等. 计及用户分级的虚拟电厂经济调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(16): 121-130.
- LI Y L, ZHOU L W, WANG D M, et al. Virtual power plant economic dispatching considering user classification[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(16): 121-130.
- [16] 屈富敏, 赵健, 蔡帜, 等. 电动汽车与温控负荷虚拟电厂协同优化控制策略[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2021, 33(1): 48-56.
- QU F M, ZHAO J, CAI Z, et al. Coordinated optimal control strategy for electric vehicle and thermostatically-controlled load aggregators[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2021, 33(1): 48-56.
- [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 Y P, MU Y F, JIA H J, 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] 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 F, XU Y J, YANG X, 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.
- [19] 陈张宇, 刘东, 刘浩文, 等. 基于精细化需求响应的虚拟电厂优化调度[J]. *电网技术*, 2021, 45(7): 2542-2550.
- CHEN Z Y, LIU D, LIU H W, et al. Optimal dispatching of virtual power plant based on refined demand response[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(7): 2542-2550.
- [20] 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 S Y, AI Q, ZHENG J P, 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.
- [21] 张尔佳, 邵能灵, 陈旸. 基于虚拟储能的综合能源系统分布式电源功率波动平抑策略[J]. *发电技术*, 2020, 41(1): 30-40.
- ZHANG E J, TAI N L, CHEN Y. A coordination strategy to smooth power fluctuation of distributed generation in integrated energy system based on virtual energy storage[J]. *Power Generation Technology*, 2020, 41(1): 30-40.
- [22] 马锐, 李相俊, 李文启, 等. 可再生能源供电区域电

- 网中储能系统协同调度策略[J]. 发电技术, 2021, 42(1): 31-39.
- MA R, LI X J, LI W Q, et al. Cooperative scheduling strategy of energy storage systems for regional grid supplied by renewable energy[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(1): 31-39.
- [23] 雷旭, 马鹏飞, 宋智帅, 等. 计及风电预测误差的柔性负荷日内调度模型[J]. 发电技术, 2022, 43(3): 485-491.
- LEI X, MA P F, SONG Z S, et al. A flexible intraday load dispatch model considering wind power prediction errors[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(3): 485-491.
- [24] 冷喜武, 刘闯, 何蕾, 等. 可调节负荷并网运行标准研究与应用[J]. 发电技术, 2022, 43(6): 834-842.
- LENG X W, LIU C, HE L, et al. Research and application of grid-connected operation standard for adjustable load[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(6): 834-842.
- [25] 贺瑜环, 杨秀媛, 陈麒宇, 等. 电动汽车智能充放电控制与应用综述[J]. 发电技术, 2021, 42(2): 180-192.
- HE Y H, YANG X Y, CHEN Q Y, et al. Review of intelligent charging and discharging control and application of electric vehicles[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(2): 180-192.
- [26] 张铁峰, 姜喜燕, 张灏璠. 基于双重激励含电动汽车的虚拟电厂优化调度[J]. 电力需求侧管理, 2022, 24(4): 21-27.
- ZHANG T F, JIANG X Y, ZHANG H F. Optimal scheduling of virtual power plant with electric vehicles based on dual incentives[J]. Power Demand Side Management, 2022, 24(4): 21-27.
- [27] 陈会来, 张海波, 王兆霖. 不同类型虚拟电厂市场及调度特性参数聚合算法研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(1): 15-28.

CHEN H L, ZHANG H B, WANG Z L. A review of market and scheduling characteristic parameter aggregation algorithm of different types of virtual power plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 15-28.

收稿日期: 2023-03-07。

作者简介:



张叶青

张叶青(1980), 男, 工程师, 研究方向为电力系统调度运行控制, sdforrest@163.com;



陈文彬

陈文彬(1988), 男, 工程师, 研究方向为电力系统调度运行控制, 691325130@qq.com;



徐律军

徐律军(1970), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统调度运行控制, xujj@sh.sgcc.com.cn;



江兴稳

江兴稳(1984), 男, 博士, 讲师, 研究方向为电力系统建模与调度运行控制, 本文通信作者, xingwen\_jiang@shiep.edu.cn。

(责任编辑 尚彩娟)