

考虑虚拟电厂可信容量的新能源电力系统容量市场出清模型

冯迎春, 范 洁, 王 阳, 刘苏云
(国网江苏省电力有限公司, 南京 210024)

摘要:随着风电和光伏发电装机规模快速增长, 系统出现了发电容量充裕度不足的问题。为确保电力系统中的充足发电容量, 需要引入容量市场机制。相比于大型火电机组的长建设周期和高投资成本, 分布式可调节资源聚合的虚拟电厂(virtual power plant, VPP)建设周期短、投资小、见效快, 是为系统提供发电容量的有效资源。因此, 构建了虚拟电厂可信容量(unforced capacity, UCAP)计算方法并提出一种考虑虚拟电厂可信容量的新能源电力系统容量市场出清模型。虚拟电厂可信容量计算模型考虑了其功率、能量以及运行特性。容量市场出清模型在考虑发电侧风电、光伏、传统机组的基础上, 增加用电侧虚拟电厂参与市场。容量市场出清模型中考虑了高峰容量需求、基本容量需求、电能需求、谷荷需求、爬坡功率需求等系统约束。最后通过算例分析了虚拟电厂可信容量、市场容量总需求量以及新能源装机容量对市场出清结果的影响, 验证了本文虚拟电厂可信容量计算方法以及容量市场出清模型的有效性。

关键词:容量市场出清模型; 新能源电力系统; 虚拟电厂; 分布式可调节资源; 电力系统可靠性; 可信容量

A capacity market clearing model for renewable energy power system considering unforced capacity of virtual power plant

FENG Yingchun, FAN Jie, WANG Yang, LIU Suyun
(State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China)

Abstract: With the rapid growth of wind and photovoltaic power, the power system is facing issues of insufficient adequacy. To ensure an ample capacity supply, it is necessary to introduce the capacity market mechanism. Compared to the large-scale thermal power plants with long construction periods and high investment costs, virtual power plants (VPP) that aggregate distributed adjustable resources has a shorter construction period, lower investment, and quicker effectiveness. VPPs serve as effective resources for providing generation capacity to the system, they can be used to manage the peak demand. Therefore, a VPP unforced capacity (UCPA) formula and a comprehensive capacity market clearing model which is designed to consider capacity offers including VPP is proposed. The proposed VPP UCAP computation formulas consider power capacity, energy capacity and operational attributes. The proposed capacity market clearing model introduces the participation of VPPs with the consideration of wind power, photovoltaic power and conventional generation units. The presented capacity market clearing model considers system constraints such as peak demand, base demand, energy requirement, off-peak demand, and ramp power demand. Finally, the impact of UCAP of VPP, total capacity demand and renewable energy installed capacity on market cleared results is analyzed by conducting the study cases, it shows the validity of the proposed VPP UCAP formulas and the capacity market clearing model.

Key words: capacity market clearing model; renewable energy power system; virtual power plant; distributed and adjustable resources; power system reliability; unforced capacity

0 引言

近年来, 伴随着风电和光伏发电占比的不断增加, 传统火电的发电空间不断被压缩, 系统的可信容量^[1](unforced capacity, UCAP)不断缩小^[2]。亟待设置容量市场对发电容量进行补偿, 通过确保其合理收益, 实现系统充裕的可信容量^[3]。相比于大型火电机组的长建设周期、高额投资成本, 分布式可

调节资源如柴油发电机组、微型燃气轮机、分布式储能等, 建设周期短、投资小、见效快, 是为系统提供可信容量的有效资源^[4-5]。

容量市场起源于美国, 例如纽约独立系统运营商、新英格兰独立系统运营商和宾夕法尼亚、新泽西和马里兰独立系统运营商^[6]。这些市场对发电容量进行竞价拍卖, 使得市场参与者能够持续向发电设施投资^[7]。在英国, 容量市场使得英国电网在2018—2019年获得了50 GW的新增发电容量^[8]。设计不当的容量市场可能对电力用户产生不利影响。因此, 合理的市场设计对于建立高效的容量市场至关重要^[9], 需要设计有效的发电容量出清模型

收稿日期: 2023-07-09; 修回日期: 2023-09-12

基金项目: 国网江苏省电力有限公司2023年业务研究项目(202363924002)

来满足新能源电力系统的发电容量需求。

不同的发电容量供应商有不同的发电容量属性,例如装机容量(installed capacity, ICAP)、可用性、不确定性等。而可信容量可以有效反映发电资源的技术可用性、不确定性等性能特征。因此,在发电容量市场中,需要计算各发电容量供应商的可信容量。

储能、虚拟电厂等新型市场主体参与容量市场出清能够增加容量市场资源,提高容量市场运行水平。文献[1]面向高比例可再生能源电力系统研究容量补偿机制。文献[3]研究适应清洁能源发展和现货市场运行的容量市场机制。文献[4]分析了储能参与容量市场的国内外现状。文献[5]研究储能资源参与容量市场出清,提出一种考虑储能的容量市场出清模型,有效地提高了系统的发电容量充裕性。但目前关于虚拟电厂的研究主要聚焦于经济性^[10]、灵活性^[11]、调峰^[12]和主辅联营^[13],鲜见研究考虑虚拟电厂的容量市场出清模型。

本文提出了一种虚拟电厂可信容量计算方法以及一种考虑虚拟电厂可信容量的新能源电力系统容量市场出清模型。虚拟电厂可信容量计算考虑了系统峰荷期容量可用性以及最小运行时间要求。容量市场出清模型中考虑了高峰容量需求、基本容量需求、电能需求、谷荷需求、爬坡功率需求等系统运行约束。算例仿真分析了虚拟电厂可信容量、容量总需求量以及新能源装机容量对市场出清结果的影响,验证了所提虚拟电厂可信容量计算方法和考虑虚拟电厂的容量市场出清模型的有效性。

1 虚拟电厂可信容量

虚拟电厂可为电网提供可信容量。可信容量反映了风、光、储能、虚拟电厂等不同能源与传统可靠能源之间的等效性。本节计算含可再生能源、不可再生能源、负荷和储能设备等分布式资源的虚拟电厂的可信容量。

本文使用容量系数法^[14]对虚拟电厂的可信容量进行计算,该方法考虑了系统峰荷期发电资源的容量系数。电力不足概率(loss of load probability, LOLP)是衡量供电可靠性的重要指标之一,LOLP高的时段更加需要风电、光伏机组出力。因此,在高峰负荷时段对风电机组、光伏机组的容量系数给予更高的权重。式(1)给出了容量系数权重的计算公式

$$w_t = \frac{L_{OLP_t}}{\sum_{j=1}^T L_{OLP_j}} \quad (1)$$

式中: w_t 为第 t 小时的权重; L_{OLP_t} 为第 t 小时的电力不足概率,其计算方法参见文献[15]; T 为总的小时数。使用这些权重来计算式(2)中最高负荷小时的加权平均可信容量

$$C_v = \sum_{j=1}^{T'} w_j C_j \quad (2)$$

式中: C_j 为第 j 小时虚拟电厂内各分布式电源的出力; T' 为近似值中使用的小时数; C_v 为高峰时段的虚拟电厂加权发电容量,被视为可信容量的近似值。下面,对虚拟电厂的各个部分进行分析。

1.1 常规非可再生能源发电机组

常规非可再生能源发电机组包括柴油发电机和微型燃气轮机。额定容量和强迫停运率(forced outage rate, FOR)是常规非可再生能源发电机组的两个关键参数。常规非可再生能源发电机的可信容量由式(3)求得

$$P_{dg} = P_{rate_d}(1 - F_{OR}) \quad (3)$$

式中: P_{dg} 为常规非可再生能源的可信容量; P_{rate_d} 为常规非可再生能源的额定容量; F_{OR} 为强迫停运率,因此, $(1 - F_{OR})$ 表示容量的可用程度。

1.2 风电机组

风电机组制造商通常会提供风电机组的功率曲线,显示功率输出与风速之间的实际关系。单台风电机组的输出功率由式(4)求得^[16]

$$P_{WT} = \begin{cases} 0 & 0 \leq V < V_{cut_in} \\ P_{rate_w}(C_1 + C_2 V + C_3 V^2) & V_{cut_in} \leq V < V_{rated} \\ P_{rate_w} & V_{rated} \leq V < V_{cut_out} \\ 0 & V_{cut_out} \leq V \end{cases} \quad (4)$$

式中: P_{WT} 为风电机组的输出功率; P_{rate_w} 为风电机组的额定功率; C_1 、 C_2 和 C_3 为与风速相关的参数,由历史数据估算得出; V 为风速; V_{cut_in} 、 V_{rated} 和 V_{cut_out} 分别为切入风速、额定风速和切出风速。

1.3 光伏机组

光伏发电将太阳能直接转化为电能,光伏机组的输出功率由式(5)求得

$$P_{PV} = P_{sc} \frac{G_{ing}}{G_{sc}} [1 + k(T_c - T_r)] \quad (5)$$

式中: P_{PV} 为光伏组件的输出功率; P_{sc} 为标准测试条件下光伏组件的最大功率; G_{ing} 为射辐照度; G_{sc} 为标准测试条件 1 000 (W/m²) 下的辐照度; k 为功率温度系数; T_c 和 T_r 分别为光伏组件温度和额定温度。

1.4 储能

储能或电池被视为可控的电源/用电设备,没有任何污染和燃料成本。为了延长电池的使用寿命,需对其运行工况进行限制,如式(6)~(8)所示

$$B_{Dt} = \max(E_{t-1}^{\text{bat}} - E_t^{\text{bat}}, 0) \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (6)$$

$$B_{Ct} = \max(E_t^{\text{bat}} - E_{t-1}^{\text{bat}}, 0) \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (7)$$

$$E_{\min}^{\text{bat}} \leq E_t^{\text{bat}} \leq E_{\max}^{\text{bat}} \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (8)$$

式中: B_{Ct} 和 B_{Dt} 分别为电池的充电和放电速率; E_t^{bat} 为在 t 时电池中存储的能量; E_{\min}^{bat} 和 E_{\max}^{bat} 分别为存储的最小和最大能量。

1.5 虚拟电厂可信容量的计算方法

本文在峰荷时段使用容量系数法计算虚拟电厂可信容量,根据式(1)计算这些系数,最后根据式(2)得到虚拟电厂可信容量。下面给出基于容量系数方法的虚拟电厂可信容量的计算步骤。

步骤1:预测风能和太阳能发电功率以及虚拟电厂负荷。首先使用威布尔分布函数^[4]对风力发电进行建模,并使用正态分布函数^[6]对光伏发电和虚拟电厂负荷进行建模。下面将风电和光伏机组的最小出力 and 虚拟电厂最大负荷的作为模拟中使用的数据,从而在最不利发电容量场景下对虚拟电厂的可信容量进行建模。常规非再生能源发电机组的可信容量采用式(3)计算。

步骤2:计算式(1)中的负荷高峰时段容量系数。基于高峰负荷时段进行计算,确定高峰负荷时段的LOLP和容量系数。

步骤3:计算步骤2中负荷高峰时段虚拟电厂的剩余发电容量。为了计算虚拟电厂的剩余容量,在峰荷时段内,将虚拟电厂的负荷从风电、光伏发电和常规不可再生能源的总发电出力中扣除,相减所得差额即为虚拟电厂的剩余发电容量。

步骤4:使用虚拟电厂储能并对其进行充电和放电,在所考虑的负荷高峰时段将其添加到虚拟电厂的剩余容量中,并且根据式(2)计算得到虚拟电厂的可信容量。在非高峰时段储能设备充电,并在高峰时段放电。在虚拟电厂容量系数较高的时段,储能装置放电。通过式(2)计算得到虚拟电厂可信容量。

2 容量市场出清模型

如图1所示,容量供应曲线由市场参与者提供的容量报价组成。容量市场出清模型以最小化发电机组容量成本为优化目标满足总容量需求

$$\min \sum_{i \in \{C_G, R_G, V_G\}} U_{Gi} B_i \bar{P}_{Ci} \quad (9)$$

式中: C_G 、 R_G 、 V_G 为表示发电侧常规发电、可再生

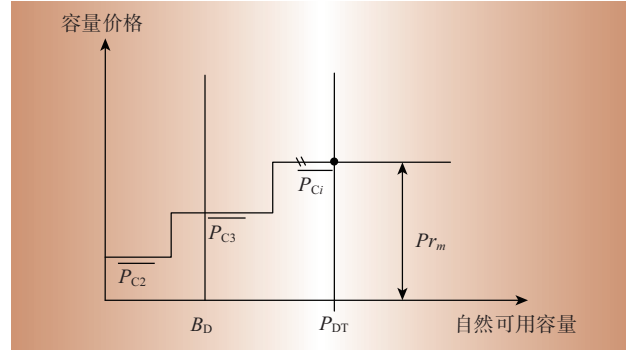


图1 容量供需曲线

Fig. 1 Capacity supply and demand curves

能源发电以及用电侧虚拟电厂发电; U_{Gi} 为发电主体 i 中标与否的二进制变量; B_i 为各发电主体 i 的容量成本; \bar{P}_{Ci} 为发电主体 i 可信容量的竞标量。出清模型的约束条件如下所示:

(1) 高峰需求约束。为了满足总容量需求,市场出清总容量等于总容量需求

$$\sum_{i \in \{C_G, R_G, V_G\}} U_{Gi} \bar{P}_{Ci} = P_{DT} \quad (10)$$

式中: P_{DT} 为出清模型的总容量需求。

(2) 基本需求约束。所选的容量供应方案能够在系统的谷荷期间降低输出。因此谷荷应该由所选容量供应方案的最小值来满足

$$\sum_{i \in \{C_G, R_G, V_G\}} U_{Gi} P_{Ci} = B_D \quad (11)$$

式中: P_{Ci} 为发电主体 i 的最小技术出力。式(11)左侧表示所选容量供应方案能够提供的最低总容量,右侧是系统的谷荷 B_D 。

(3) 爬坡功率约束。市场出清总容量需满足系统的爬坡功率需求,爬坡需求主要是由快速变化的系统负荷和风电/光伏机组出力引起的,它应该由常规发电、虚拟电厂发电出力来满足

$$\sum_{i \in \{C_G, V_G\}} U_{Gi} \bar{P}_{Ci} R_{\text{amp}_P} \geq P_{DT} R_{\text{amp}_R} + \sum_{j \in \{R_G\}} U_{Gj} \bar{P}_{Cj} R_{\text{amp}_P} \quad (12)$$

式中: R_{amp_P} 为发电主体 i 的爬坡功率; R_{amp_R} 为系统的爬坡功率需求。式(12)左侧是市场出清总容量提供的总爬坡功率,右侧是系统负荷爬坡功率需求和可再生能源发电机组的爬坡功率需求。

(4) 电能需求约束。系统的总电能需求通过式(13)计算得到。式(14)表示所有发电机提供的系统电能,这些电能来源于风电、光伏和传统机组等发电主体的容量供应(不包括虚拟电厂的发电容量)。式(15)表示为了满足系统运行需求,所有发电机可提供的电能高于系统的总电能需求

$$S_{ER} = P_{DT} N_H S_{LF} \quad (13)$$

$$S_{ES} = \sum_{i \in \{C_G, R_G\}} U_{Gi} \bar{P}_{Ci} P_{LFi} N_H \quad (14)$$

$$S_{ES} \geq S_{ER} \quad (15)$$

式中： S_{ER} 为系统的总电能需求； N_{H} 为容量供应时长； S_{LF} 为系统的负荷因子； S_{ES} 为所有发电机提供的系统电能； P_{LF_i} 为发电主体 i 的负荷因子。

(5) 常规机组的可信容量:不同发电机组的自然可用发电容量不尽相同。因此,对于每种类型的发电机组均计算其可信容量。对于常规发电机组,可信容量通过额定装机容量乘以技术可用性来计算

$$\overline{P}_{\text{Gi}} = C_{\text{APi}}(1 - F_{\text{Oi}}) \quad \forall i \in \{C_{\text{G}}\} \tag{16}$$

式中： C_{APi} 为发电主体 i 的额定装机容量； F_{Oi} 为其强制停运率。

(6) 风电/光伏机组的可信容量:对于风电/光伏发电机组,可信容量是由其额定装机容量和根据系统峰荷时段历史资源可用性所确定的容量因子计算得到^[6]

$$\overline{P}_{\text{Gi}} = C_{\text{APi}} C_{\text{Fi}} \quad \forall i \in \{R_{\text{G}}\} \tag{17}$$

$$C_{\text{Fi}} = \frac{A_{\text{PE}}}{C_{\text{APi}} N_{\text{HP}}} \quad \forall i \in \{R_{\text{G}}\} \tag{18}$$

式中： C_{Fi} 为发电主体 i 的容量因子； A_{PE} 、 N_{HP} 分别为发电主体在系统峰荷期间的平均出力 and 发电时长。

3 算例分析

对所提出的虚拟电厂可信容量计算方法和容量市场出清模型进行算例仿真计算与分析。市场总容量需求为1 257 MW。发电侧参与容量市场的22家传统机组发电主体参数采用文献[15]算例数据修改,如表1所示,各传统机组参数详见文献[17]。发

表1 参与容量市场的传统机组参数

Table 1 Parameters of traditional units participating in capacity market

传统机组	容量报价/(元·MW ⁻¹ ·d ⁻¹)	最大可用容量/MW
G1	42	60
G2	49	60
G3	56	60
G4	63	60
G5	70	60
G6	77	60
G7	84	60
G8	91	100
G9	98	100
G10	105	100
G11	112	100
G12	147	70
G13	161	70
G14	175	70
G15	189	70
G16	210	30
G17	231	30
G18	252	30
G19	273	30
G20	294	30
G21	326	30
G22	364	30

电侧参与容量市场的新能源机组装机容量为600 MW,风电和光伏的装机容量均为300 MW,风电和光伏的容量因子分别为0.36、0.18,风电和光伏的容量报价均为每天38.5元/MW。用电侧参与容量市场的虚拟电厂各分布式资源总装机容量采用文献[11]算例数据修改,如表2所示。虚拟电厂储能的充放电效率均为85%、最大充放电深度均为其装机容量的90%、最小充放电深度为其装机容量的20%。虚拟电厂各分布式资源在系统高峰负荷日各时段的运行数据采用文献[18]算例数据修改,如表3所示,虚拟电厂的容量报价为每天196元/MW。

表2 虚拟电厂各分布式资源总装机容量

Table 2 Total installed capacity of each of distributed resource of VPP

	储能装置	光伏机组	风电机组	柴油发电机组	微型燃气轮机
装机容量	5.6	8.4	9.5	5.5	6.5

表3 虚拟电厂各分布式资源高峰负荷日各时段运行数据

Table 3 Operation data for each period of each distributed resource peak load day of VPP

时段	P_{dg}/MW	P_{PV}/MW	P_{WT}/MW	P_{VPL}/MW
1	13	0	5.67	9.61
2	13	0	3.91	11.11
3	13	0	3.57	10.16
4	13	0	6.63	10.61
5	13	0	4.62	9.91
6	13	0	7.99	9.66
7	13	0	6.51	8.42
8	13	0.97	4.95	7.95
9	13	3.61	8.41	9.46
10	13	6.06	3.69	10.75
11	13	6.51	7.26	11.56
12	13	7.09	4.71	12.29
13	13	7.19	5.54	12.76
14	13	6.66	8.41	13.07
15	13	6.17	8.41	13.52
16	13	4.23	8.41	13.83
17	13	0.86	7.16	13.77
18	13	0	8.41	14.02
19	13	0	6.24	14.47
20	13	0	8.4	14.14
21	13	0	5.46	12.76
22	13	0	3.61	11.22
23	13	0	5.29	10.86
24	13	0	5.29	10.27

3.1 虚拟电厂的可信容量计算

可信容量可信容量虚拟电厂可信容量计算的各时段数据如表4所示。

表4 虚拟电厂可信容量计算结果
Table 4 Results of the VPP's UCAP calculation

时段	L_{OLP}	w_i	C_i/MW	$w_i C_i/\text{MW}$
1	0.000 5		7.94	
2	0.001 0		5.79	
3	0.000 6		6.41	
4	0.000 8		9.02	
5	0.000 6		7.71	
6	0.000 5		11.34	
7	0.000 4		9.96	
8	0.000 6		9.86	
9	0.000 5		14.43	
10	0.000 9		12.01	
11	0.001 1	0.070 5	15.21	1.07
12	0.001 2	0.076 9	12.41	0.95
13	0.001 4	0.089 7	12.97	1.16
14	0.001 5	0.096 1	14.99	1.44
15	0.001 6	0.102 5	14.05	1.44
16	0.001 7	0.108 9	12.92	1.41
17	0.001 6	0.102 5	7.23	0.74
18	0.001 8	0.115 3	8.49	0.98
19	0.001 9	0.121 7	5.89	0.72
20	0.001 8	0.115 3	8.38	0.97
21	0.000 6		5.69	
22	0.001 0		5.38	
23	0.000 9		7.43	
24	0.000 6		8.02	

由表4可见,虚拟电厂可信容量计算考虑了风电和光伏的可用出力和可靠性指标,考虑了常规非可再生能源机组,如柴油发电机组和微型燃气轮机的出力约束和可靠性指标,考虑了储能的能量约束、充放电功率约束和可靠性约束,考虑了虚拟电厂负荷特性和可靠性指标。所提虚拟电厂可信容量计算方法较为全面地反映了虚拟电厂各分布式资源具体特性对其可信容量的影响。

3.2 虚拟电厂可信容量对市场出清的影响

应用本文容量市场出清模型,分别对考虑虚拟电厂和不考虑虚拟电厂两种场景下的出清结果进行比较。

不考虑虚拟电厂时,市场出清价格为每天210元/MW,容量采购成本共计263 970元。在相同的市场参数下,考虑虚拟电厂时市场出清价格降至每天196元/MW,总容量采购成本为246 372元。虚拟电厂参与市场出清可以降低市场容量采购成本。另外,虚拟电厂参与容量市场为系统提供了4.3%的总爬坡功率需求贡献。因此,在容量市场中,虚拟电厂参与出清提高了系统运行可靠性和经济性。

3.3 容量总需求量对市场出清的影响

容量总需求量是容量市场出清中的主要参数,容量总需求量对容量出清结果产生较大影响。保持其他因素不变,改变容量总需求量,分别将容量总需

求量增加2.4%、4.8%、7.4%和9.6%,市场出清的容量总成本分别为290 367元、316 764元、343 161元和369 558元。容量总需求量越高,容量市场采购总成本越高。容量市场采购总成本与容量总需求显著关联。新能源机组可信容量远低于常规机组,新能源机组在电力系统渗透率越高,系统容量资源越稀缺。随着新型电力系统建设加快发展,虚拟电厂纳入容量市场出清,为新能源电力系统增加新的容量资源非常必要。

3.4 新能源装机容量对市场出清的影响

新能源机组参与容量市场将直接影响中标结果及容量价格,即由于新能源机组可以在电能量市场中取得较高收益,而参与容量市场时单位有效容量报价相对较低,容量市场出清将被优先选中并影响其他虚拟电厂和传统机组出清结果。下面将通过改变参与报价的新能源机组装机容量来分析出清结果的变化情况。不同新能源装机下容量市场出清结果如图2所示,不同装机容量下风电机组和光伏机组装机容量比例设为1:1。

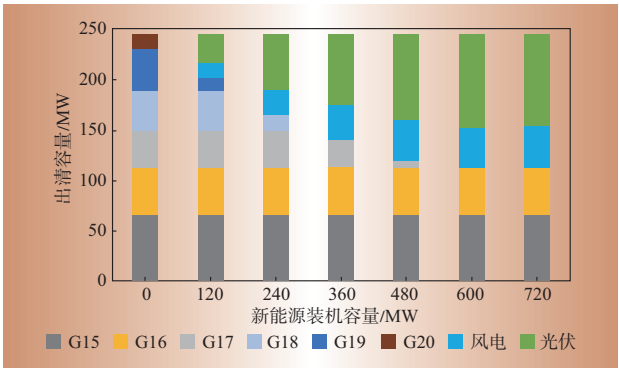


图2 不同新能源装机下容量市场出清结果

Fig. 2 Clearing results of capacity market with respect to different renewable installed capacity

如图2所示,随着风电和光伏机组装机容量的增加,容量市场中报价远高于新能源机组的传统机组将被替代。当新能源机组装机容量达到120 MW时,G20在容量市场中的出清容量为0 MW;当新能源机组装机容量增至240 MW时,G17、G18和G19机组均不再中标。由于参与竞价的市场主体虚拟电厂、传统机组G1至G14在不同新能源装机容量下均以最大容量出清、传统机组G20和G21在不同新能源装机容量下均未中标,图2中未显示。同时,风电和光伏机组始终以可信容量参与容量市场,中标份额保持持续增长。

4 结束语

本文建立了容量出清市场中虚拟电厂的可信容量计算模型,确定了其参与市场的可信容量;提

出了一种考虑虚拟电厂可信容量的新能源电力系统容量市场出清模型,所提出的模型纳入了虚拟电厂参与市场。仿真研究表明,市场出清结果受虚拟电厂可信容量、容量总需求以及新能源装机容量影响。虚拟电厂的参与使得系统容量成本降低,系统运行可靠性提高;容量总需求越高,市场出清总成本越高;新能源机组单位有效容量报价较低,优先于虚拟电厂和传统机组中标,新能源机组的中标份额随着新能源机组装机容量扩大而持续增长。D

参考文献:

- [1] 刘硕,于松泰,孙田,等.面向高比例可再生能源电力系统的容量补偿机制研究[J].电网技术,2022,46(5):1780-1789.
LIU Shuo, YU Songtai, SUN Tian, et al. Capacity compensation mechanism for highly-proportional renewable energy power systems [J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1780-1789.
- [2] 王蓓蓓,亢丽君,苗曦云,等.考虑可信度的新能源及需求响应参与英美容量市场分析及思考[J].电网技术,2022,46(4):1233-1247.
WANG Beibei, KANG Lijun, MIAO Xiyun, et al. Analysis and enlightenment of renewable energy and demand response participating in UK and US capacity markets considering capacity credibility [J]. Power System Technology, 2022, 46(4): 1233-1247.
- [3] 尚楠,张翔,宋艺航,等.适应清洁能源发展和现货市场运行的容量市场机制设计[J].电力系统自动化,2021,45(22):174-182.
SHANG Nan, ZHANG Xiang, SONG Yihang, et al. Design of capacity market mechanism adapting to clean energy development and spot market operation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(22): 174-182.
- [4] 丁涛,孙嘉玮,黄雨涵,等.储能参与容量市场的国内外现状及机制思考[J/OL].电力系统自动化:1-22 [2023-08-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20230424.1608.006.html>.
DING Tao, SUN Jiawei, HUANG Yuhang, et al. Domestic and foreign present situation of capacity market with energy storage and thought on its mechanism [J/OL]. Automation of Electric Power Systems: 1-22 [2023-08-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20230424.1608.006.html>.
- [5] OPATHELLA C, ELKASRAWY A, MOHAMED A A, et al. A novel capacity market model with energy storage [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(5): 5283-5293.
- [6] BHAGWAT P C, DE VRIES L J, HOBBS B F. Expert survey on capacity markets in the U.S.: Lessons for the EU [J]. Utilities Policy, 2016, 38: 11-17.
- [7] 张涛,胡娱欧,张晶,等.适应高比例新能源发展的电力市场容量保障机制分析[J].电力建设,2021,42(3):117-125.
ZHANG Tao, HU Yuou, ZHANG Jing, et al. Analysis of power market capacity remuneration mechanisms adapted to high penetration of renewable energy development [J]. Electric Power Construction, 2021, 42(3): 117-125.
- [8] SCHLANDT J. Capacity markets around the world [N]. Clean Energy Wire, 2017-8-19. <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/capacity-markets-around-world>.
- [9] 陈政,尚楠,张翔.兼容多目标调控需要的新型容量市场机制设计[J].电网技术,2021,45(1):198-207.
CHEN Zheng, SHANG Nan, ZHANG Xiang. Design of capacity market mechanism with multi-objective regulation [J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 198-207.
- [10] 高政南,刘康平,张跃龙,等.电力市场环境虚拟电厂经济效益敏感因素分析[J].电力需求侧管理,2022,24(4):1-6.
GAO Zhengnan, LIU Kangping, ZHANG Yuelong, et al. Sensitive factors analysis of economic benefit for virtual power plant in open power market [J]. Power Demand Side Management, 2022, 24(4): 1-6.
- [11] 韩亮,张维静,胡娱欧,等.考虑虚拟电厂的电力系统灵活性提升方案研究[J].电力需求侧管理,2022,24(4):14-20.
HAN Liang, ZHANG Weijing, HU Yuou, et al. Power system flexibility improvement scheme considering virtual power plant [J]. Power Demand Side Management, 2022, 24(4): 14-20.
- [12] 王建军,傅晨,费斐,等.考虑虚拟电厂参与调峰的电源容量规划[J].电力需求侧管理,2022,24(4):7-13.
WANG Jianjun, FU Chen, FEI Fei, et al. Power capacity planning considering the participation of virtual power plants in peak shaving market [J]. Power Demand Side Management, 2022, 24(4): 7-13.
- [13] 杨梓俊,荆江平,邓星,等.虚拟电厂参与江苏电网辅助服务市场的探讨[J].电力需求侧管理,2021,23(4):90-95.
YANG Zijun, JING Jiangping, DENG Xing, et al. Discussion on virtual power plant participating in ancillary service market of Jiangsu power grid [J]. Power Demand Side Management, 2021, 23(4): 90-95.
- [14] 聂君,刘钢.估算厂用电率的负荷率法[J].中国电力,2013,46(9):44-46.
NIE Jun, LIU Gang. Estimation of auxiliary power consumption rate with load ratio method [J]. Electric Power, 2013, 46(9): 44-46.
- [15] 张紫凡.不同时间尺度的风功率建模及LOLP算法研究[J].可再生能源,2014,32(11):1658-1664.
ZHANG Zifan. Different time scales of wind power modeling and LOLP algorithm research [J]. Renewable Energy Resources, 2014, 32(11): 1658-1664.
- [16] 陈中,胡吕龙,丁楠.基于改进熵的风光储互补并网系统优化运行[J].电力系统保护与控制,2013,41(21):86-91.
CHEN Zhong, HU Lylong, DING Nan. Optimized operation of wind-solar-battery hybrid power system based on improved entropy [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 86-91.
- [17] HASCHKE B, KEANE A, O'MALLEY M. Capacity value of wind power, calculation, and data requirements: the Irish power system case [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(1): 420-430.
- [18] HAKIMI S, HASANKHANI A, SHAFIE-KHAH M, et al. Optimal sizing and siting of smart microgrid components under high renewables penetration considering demand response [J]. IET Renewable Power Generation, 2019, 13(10): 1809-1822.

作者简介:

冯迎春(1966),男,江苏盐城人,学士,研究员级高级工程师,主要从事电力市场运营管理工作;

范洁(1977),女,江苏如皋人,学士,正高级工程师,主要从事于电力市场运营工作。

(责任编辑 王 蕊)