

电力市场环境下虚拟电厂经济效益敏感因素分析

高政南¹,刘康平¹,张跃龙¹,周飞航¹,王灏¹,姜楠²,陈启鑫²

(1. 内蒙古电力交易中心有限公司,呼和浩特 010020;2. 电力系统及大型发电设备安全控制和仿真国家重点实验室(清华大学),北京 100084)

Sensitive factors analysis of economic benefit for virtual power plant in open power market

GAO Zhengnan¹, LIU Kangping¹, ZHANG Yuelong¹, ZHOU Feihang¹, WANG Hao¹,
JIANG Nan², CHEN Qixin²

(1. Inner Mongolia Power Exchange Center Co., Ltd., Hohhot 010020, China; 2. State Key Laboratory of Power System and Generation Equipment(Tsinghua University), Beijing 100084, China)

摘要:随着我国对新型电力系统建设要求的不断明确,虚拟电厂(virtual power plants, VPP)的建设得到了业界的广泛关注。然而,在虚拟电厂规模化推进建设和运营过程中,市场化环境下的经济效益影响因素尚未得到充分研究。针对此问题,对虚拟电厂的建设投资成本、运营成本和收益情况进行梳理,构建了虚拟电厂经济效益模型;进一步,在市场化收益的视角下选取敏感因素,提出虚拟电厂参与不同市场交易品种的经济效益分析方法;最后,给出算例验证,讨论了虚拟电厂经济效益在不同敏感因素条件下的变化趋势。研究结果可为新型电力系统市场环境下的虚拟电厂合理有效回收成本、参与市场交易提供客观的评价方法支持。

关键词:虚拟电厂;敏感因素分析;经济效益;市场化收益

Abstract: With the continuous clarification of China's requirements for the construction of new power system, the construction of VPP has been widely concerned by the industry. However, in the process of large-scale construction and operation of VPP, the factors influencing the economic benefits under the market environment have not been fully studied. Aiming at this problem, the construction investment costs, operation costs and incomes of VPP are sorted out, and the economic benefit model of VPP is constructed. Furthermore, from the perspective of market income, the sensitive factors are selected and the economic benefit analysis method of VPP participating in different market trading varieties is proposed. Finally, example verifications are given, and the variation trend of economic benefit of VPP under different sensitive factors is discussed. The results can provide objective evaluation method support for VPPs to recover costs reasonably and effectively and participate in market transactions under new power system market environment.

Key words: virtual power plant; analysis of sensitive factors; economic benefits; market return

0 引言

中央财经委员会第九次会议提出加快构建新型电力系统的要求,明确了新型电力系统应具备更强消纳新能源的能力、开放互动、灵活高效等基本特征^[1]。虚拟电厂作为构成新型电力系统的重要主体之一,能够将分布式电源、储能、电动汽车等多种可调节资源有机结合,通过通信技术与控制技术,对可调节资源进行调控以实现内部资源的整体优化。分析影响虚拟电厂经济效益的投资运营成本、收益来源等多种敏感因素,将有利于虚拟电厂优化建设运营,支撑长效发展。

当前对虚拟电厂经济效益的相关研究主要聚焦于4个方面。一是优化虚拟电厂的内部资源运行方式以获得更高收益。文献[2]研究了确保虚拟电厂在日前市场收益最大化的内部基础配置组合策略;文献[3]和文献[4]研究了确保虚拟电厂成本效益最优、风险可控的聚合风、光、水等能源的内部优化运行方式。二是对虚拟电厂内部资源利益的重新分配以提升总体效益。文献[5]研究了基于改进Shapley算法对风电与聚合商合作博弈后的利益重新分配;文献[6]基于时间尺度对虚拟电厂内部合作博弈后的剩余利益分配因素进行了探讨。三是研究虚拟电厂参与电力市场的机制以获得增量收益。文献[7]研究了虚拟电厂参与现货市场时兼顾风险、提升收益的交易策略;文献[8]和文献[9]研究了虚拟电厂通过参与调峰、调频等辅助服务获取收益补偿的方

收稿日期:2022-04-28;修回日期:2022-05-16

基金项目:内蒙古电力(集团)有限责任公司科技项目(ZB-ZXZB-2018-JY0401-0670)

式。四是研究了与虚拟电厂有关的效益影响条件。文献[10]研究了多投资商虚拟电厂的容量配置对成本效益的影响;文献[11]研究了分布式电源聚合状态下的虚拟电厂成本效益以支撑电源规划;文献[12]建立了虚拟电厂的效益评价指标体系并进行了论证。

尽管上述文献在对虚拟电厂的效益研究方面取得了一定进展,但未能虚拟电厂规模化推进建设和运营过程中,对市场化环境下的经济效益影响因素展开充分研究,也缺乏算例分析与讨论。为此,本文基于虚拟电厂在一定区域内具备直接控制供能、用能和储能等资源的特点,对电力市场环境下虚拟电厂经济效益的敏感因素展开分析。首先对虚拟电厂的建设投资成本、运营成本和收益来源进行梳理,构建了虚拟电厂经济效益模型;在此基础上,从市场化收益的视角下选取影响敏感因素,提出虚拟电厂参与不同市场交易品种的经济效益分析方法;最后,通过算例验证,讨论了虚拟电厂经济效益在不同敏感因素条件下的变化趋势,并通过投资回收期等指标对不同敏感因素进行综合考量。

1 经济效益构成

典型的虚拟电厂通常包括分布式电源、储能和可控负荷等资源,其经济效益通常需要考虑成本和收益两个部分,成本主要包括建设投资成本和运营成本,收益主要来源于市场化交易和政策补贴等。

1.1 建设投资成本

初始建设投资成本包括土建成本、硬件设备安装、软件系统布控等成本。现将全部成本统一考虑为综合建设投资成本 C_T , 即

$$C_T = I_1 + I_2 + I_3 \quad (1)$$

式中: I_1 、 I_2 和 I_3 分别为分布式电源、储能设备和电动汽车的建设投资相关成本。

1.2 运行维护成本

虚拟电厂的日常运营主要包括对软硬件设备的维护和运营产生的人力费用和设备检修费用。一般运营维护成本 C_o 按年计算, 即

$$C_o = \theta I_o \quad (2)$$

式中: θ 为运行维护成本系数; I_o 为虚拟电厂的年运维成本。

1.3 市场化收益

(1) 调峰交易

虚拟电厂典型的收益方式是通过参与削峰填谷交易, 以对应的峰谷分时电价计算收益。此时, 虚拟电厂可在价格高峰时段通过储能设备放电、分布式电源发电获取收益; 在低谷时段通过储能设备、电动

汽车充电降低成本。虚拟电厂调峰收益为

$$B_s = \gamma_s (C_{1,t}^s \Delta t_1 + C_{2,t}^s \Delta t_2) \quad (3)$$

$$B_d = \gamma_d (C_{2,t}^d \Delta t_1 + C_{3,t}^d \Delta t_2) \quad (4)$$

式中: B_s 和 B_d 分别为参与削峰和填谷的收益; γ_s 和 γ_d 分别为削峰和填谷的对应时刻价格; $C_{1,t}^s$ 、 $C_{2,t}^s$ 、 $C_{2,t}^d$ 和 $C_{3,t}^d$ 分别为分布式电源、储能和电动汽车提供的调节容量; Δt_1 和 Δt_2 分别为参与削峰和填谷交易的周期。

由于储能设备的充放电效率损耗, 在参与调峰的充放电过程中会导致一定的电量损耗 E_{ch} , 即

$$E_{ch} = \Delta t_2 (C_2^s - C_2^d) \eta_{eff} \eta_{dep} \quad (5)$$

式中: C_2^s 和 C_2^d 分别为储能充电和放电容量; η_{eff} 和 η_{dep} 分别为每个充放电循环中的充放电效率、充放电深度损耗。

由于虚拟电厂聚合储能参与调峰的过程中可能产生充放电损耗, 需要一部分充电费用。因此, 虚拟电厂在调峰市场中的每日收益 B_{s+d} 为

$$B_{s+d} = B_s + B_d - \gamma_{s(d)} E_{ch} \quad (6)$$

(2) 调频交易

根据调频交易规则, 市场主体参与调频交易的收益分为调频容量补偿和调频里程补偿。虚拟电厂一般以聚合的储能资源参与调频交易, 每日调频容量收益 B_{cap} 为

$$B_{cap} = P_2 \gamma_{cap} \quad (7)$$

式中: P_2 为储能的可调节容量; γ_{cap} 为调频容量补偿价格。

每日调频里程收益 B_{mil} 为

$$B_{mil} = \sum_{t=1}^{24} P_{mil,t} \cdot \gamma_{mil} \cdot \bar{K} \quad (8)$$

式中: $P_{mil,t}$ 为在时段 t 的储能调频里程; \bar{K} 为调频性能综合指标的归一化平均值; γ_{mil} 为调频里程补偿价格。

与调峰类似, 虚拟电厂聚合储能参与调频过程中同样会产生充放电损耗, 调频市场的每日收益 B_{reg} 为

$$B_{reg} = B_{cap} + B_{mil} - \gamma_E E_2 \quad (9)$$

式中: γ_E 为能量市场价格; E_2 为储能消耗的电能。

(3) 电能量现货交易

在现货交易启动后, 调峰交易将自动融入现货电能量市场。虚拟电厂可通过参与现货交易获得电能量收益, 通过峰谷价差获利, 模型与调峰类似。相对于调峰交易, 虚拟电厂参与现货交易后不得随意退出, 并且峰谷电价由市场化方式决定。

1.4 经济性评价

(1) 项目净现值 NPV

净现值 (net present value, NPV) 是反映虚拟电

厂项目整体投资在全生命周期内获利能力的动态评价指标^[13]。NPV可表示为

$$NPV = \sum_{m=1}^T \frac{(C_1 - C_0)}{(1+r)^m} \quad (10)$$

式中： T 为项目运行的周期； C_1 和 C_0 分别为资金的流入和流出； m 为对应的时间； r 为基准收益率； NPV 为评价项目盈利能力的绝对指标。当 $NPV > 0$ 时，说明能够得到超额收益；当 $NPV = 0$ 时，说明能够满足基准收益率要求的盈利水平；当 $NPV < 0$ 时，说明收益水平无法满足基准收益率要求，无法回收成本。

(2) 内部收益率 IRR

内部收益率(internal rate of return, IRR)是用来衡量项目盈利水平的指标^[14]。IRR为假设NPV为0时的贴现率取值，即当 $r = IRR$ 时，满足

$$NPV(r = IRR) = 0 \quad (11)$$

内部收益率不需要任何前置参数就可以计算，表现的是项目本身的盈利能力，内部收益率越高则项目的可行性越强。

2 敏感因素选取

根据虚拟电厂的经济效益构成，可知初期建设成本为一次性投入，运维成本相对固定，经济效益主要受到市场化交易和一次性政策补贴影响。由于各地对于虚拟电厂以及内部资源的支持政策差异性较大，且一般为市场外一次性支付资金，政策补贴无法作为有规律的敏感因素进行分析。因此，虚拟电厂的经济效益在考虑初期成本的基础上，以参与不同市场化交易产生的收益作为主要敏感因素展开研究。

2.1 参与调峰交易

在市场化环境建立初期，虚拟电厂通过参与调峰交易获取主要收益。内部聚合的分布式电源出力具有反调峰特性，都不具备调峰能力，仅能通过发电成本较低的特点为虚拟电厂内的储能、电动汽车等资源充电，余量可返送电网。储能设备具备充放电可控可调的特点，可通过谷时低价充电、在早晚用电高峰期放电提高收益获取能力。电动汽车主要起到需求响应的调节作用，谷时低价购电，以降低虚拟电厂的市场化购电成本。此时，虚拟电厂参与调峰交易对应峰谷时段调节电量的分配是影响经济效益的敏感因素。

2.2 参与调频交易

虚拟电厂可参与大电网的调频交易以支撑大电网的稳定运行。由于分布式电源不具备稳定可控条

件，虚拟电厂参与调频多以聚合的储能资源为主。当虚拟电厂接受调度指令后，储能资源具备较燃煤机组更精准的响应能力和更高效的响应效率，能够实现对于系统负荷的跟踪调整，从而获得更高的调频里程费用和调频容量费用。此时，虚拟电厂内储能资源的参与量价是影响经济效益的敏感因素。

2.3 参与调峰和调频交易

为了促使虚拟电厂的市场化收益水平最大化，需要将有限的内部聚合资源有效应用于调峰和调频交易。考虑到虚拟电厂中储能是市场化收益的主要资源，由于季节气候的影响，一年内较大的峰谷价差时段有限，而参与调频是一个长期的过程，无法随进随出，因此在虚拟电厂参与调峰与调频的过程中需要以储能的可循环次数为约束条件，合理分配参与调峰和调频空间。

2.4 参与现货交易

现货交易启动后，虚拟电厂将参与到连续开市的市场化交易中。与调峰相比，市场价格将从相对固定的削峰填谷价格转化为随市场波动的现货出清价，价格水平随行就市。主要约束条件在于储能循环次数、充放(发用)电量和对应的市场电价。经济效益的敏感因素在于现货交易中不同价差日的电量分配。

2.5 参与现货和调频交易

虚拟电厂同时参与现货和调频两种市场化交易品种，同样应将有限的资源合理分配在高收益的市场化交易中。此时经济效益的敏感因素需要考虑调频交易高价周期和现货交易高价差的周期分布，将可用资源全部分配至价格最高的交易品种，剩余资源再向次优资源覆盖。

3 算例分析

本文以某地新建虚拟电厂为例，该虚拟电厂对内部分布式光伏、电化学储能和电动汽车等资源采取直控方式。首先设定虚拟电厂投资成本、运维成本及电价等基本参数，作为经济性分析边界条件；其次，以虚拟电厂消耗电能由内部资源供给的比例为阈值，即用电(充电)分别由内部资源100%、60%、20%供给，对调峰、调频和现货等独立交易场景、组合交易场景下虚拟电厂的市场化收益敏感因素展开分析；最后，结合经济效益评价得出相应敏感因素分析结果。

3.1 虚拟电厂参数

设定聚合的分布式光伏总容量5 MW，储能电站为5 MW/10 MWh磷酸铁锂电池^[15]，电动汽车总容量0.3 MW^[16-17]，具体参数如表1所示。

表1 虚拟电厂基本参数

Table 1 Basic parameters of VPP

聚合资源	参数	数值
分布式光伏	总容量/MW	5
	投资成本/万元	2 500
	年运维成本/万元	25
电化学储能	总容量/MW	5
	投资成本/万元	2 000
	循环寿命/次	5 000
	使用寿命/a	10
电动汽车	年运维成本/万元	20
	充电桩安装/万元	100
	电池容量/kWh	60
	最高充电功率/kW	7

3.2 市场电价设置

参考某省现货交易启动前的调峰交易历史价格,调峰交易结果最高价格为900元/MWh,交易均价为360元/MWh。根据某省调频市场的出清结果,调频里程出清价格范围为2~12元/MW,全年调频里程出清均价5元/MW,调频里程最高均价9元/MW,调频里程最低均价3元/MW,调频容量补偿12元/MWh,具体参数如表2所示。

表2 调频里程价格场景

Table 2 Price scenarios of frequency modulation mileage

场景	价格/(元·MW ⁻¹)	发生概率月/天
调频里程高价	9	2/60
调频里程低价	3	4/125
调频里程均价	5	6/180

某省现货启动后,市场出清电价范围为0~1.5元/kWh,按照某省历次现货出清价格规律设定价格场景如表3所示。

表3 现货交易价格场景

Table 3 Price scenarios of spot market

场景	谷时段价格/ (元·kWh ⁻¹)	峰时段价格/ (元·kWh ⁻¹)	峰谷价差/ (元·kWh ⁻¹)	发生 概率/%
高价差	0.3	1.5	1.2	10
中价差	0.2	0.6	0.4	50
低价差	0.1	0.3	0.2	40

3.3 市场化收益敏感因素分析

(1) 分别参与调峰和调频交易的收益

在市场建设初期,虚拟电厂以参与调峰交易为主,具备条件后可进一步参与调频交易。表4为虚拟电厂分别参与调峰和调频交易的整体收益。在参与调峰交易中,虚拟电厂聚合分布式电源利用成本低的优势,在价格低谷时段为储能和电动汽车充电;储能资源利用充放可控的优势,在一天内通过两次满充满放循环,在峰时放电、谷时充电获取收

益;电动汽车在低谷时充电降低虚拟电厂综合成本。在参与调频交易时,虚拟电厂聚合的储能资源提供了里程和容量的响应,内部供电的成本主要来自电动汽车充电。总体来看,调频交易的收益显著优于调峰交易,并且在市场价格较为稳定的当前阶段,推动分布式电源更多参与外部市场,可获取的收益将高于向内部供电。

表4 虚拟电厂分别参与调峰、调频的收益

Table 4 Incomes of VPP participating in peak shaving and frequency modulating

交易场景	敏感度配置		
	100%	60%	20%
调峰总收益	321.51	328.70	335.89
余量电量收益	140.58	192.35	244.12
内部供电成本	17.98	62.55	107.13
调频总收益	560.35	562.54	564.73
余量电量收益	230.58	246.35	262.12
内部供电成本	5.48	19.05	39.42

(2) 同时参与调峰和调频的收益

在尚未开展现货交易的地区,调峰交易与调频交易同步开展。表5为虚拟电厂同时参与调峰和调频的整体收益情况。设定两种交易场景:①虚拟电厂在高价时段参与削峰,在其余时段参与调频交易;②在调频高价周内响应调频信号,在其余时段仍参与调峰交易。通过收益的对比,可知虚拟电厂在参与调频交易时大量规避了从市场购电的成本支出,以调频为主的场景收益要大幅高于以调峰为主的场景。

表5 虚拟电厂同步参与调峰和调频的收益

Table 5 Incomes of VPP participating in peak shaving and frequency modulating simultaneously

交易场景	敏感度配置		
	100%	60%	20%
调频为主、调峰为辅	484.06	488.05	492.04
余量电量收益	198.18	226.91	255.64
内部供电成本	9.98	34.71	59.45
调峰为主、调频为辅	423.89	431.08	438.27
余量电量收益	140.58	192.35	244.12
内部供电成本	17.98	62.55	107.13

(3) 参与现货、联合调频的收益

在现货交易启动后,市场主体一般以参与单一交易品种起步,逐步完善联合参与条件。表6为虚拟电厂参与单一现货交易和参与现货、调频联合交易的收益分析。总体上,将资源更多分配于参与调频交易,会创造更高的收益。现货交易以市场化方式激励峰谷差继续拉大,收益高于参与调峰。同时

参与现货与调频交易,是目前全部场景中虚拟电厂可获得收益效果最优的情况。

表6 虚拟电厂参与现货、调频的收益

Table 6 Incomes of VPP participating in spot market and frequency modulating

交易场景	敏感度配置		
	100%	60%	20%
现货交易收益	432.86	463.52	494.18
余量电量收益	256.20	273.72	291.24
内部供电成本	43.80	30.66	17.52
调频为主、现货为辅	598.48	629.14	659.80
余量电量收益	256.20	273.72	291.24
内部供电成本	43.80	30.66	17.52
现货为主、调频为辅	515.46	546.12	576.78
余量电量收益	43.80	273.72	291.24
内部供电成本	43.80	30.66	17.52

万元

3.4 经济效益敏感因素分析

考虑虚拟电厂净现值 $NPV=0$ 的条件下,内部收益率 IRR 水平。虚拟电厂参与各类市场化交易的经济效益如表7所示。

表7 虚拟电厂经济效益分析

Table 7 Economic benefit analysis of VPP

交易场景	回收周期/a	不同敏感度配置的 IRR /%		
		100%	60%	20%
调峰	7	1.36	1.97	2.57
调频	4	3.18	3.35	3.52
调频为主、调峰为辅	5	5.16	5.48	5.79
调峰为主、调频为辅	5	0.32	0.92	1.51
现货	5	1.06	3.54	5.95
调频为主、现货为辅	4	6.10	8.39	10.65
现货为主、调频为辅	5	-0.36	2.07	4.45

在对虚拟电厂市场化收益敏感因素分析的基础上,考虑储能资源的生命周期较短,因此以优先回收储能投资为边界条件,通过对虚拟电厂建设成本、运营成本、市场收益等总体考虑,以 IRR 判断虚拟电厂经济效益的敏感度因素。可以得出:① 虚拟电厂单独参与调频交易比单独参与调峰交易的收益率更高、成本收回年限更短;② 参与调频的资源占比越高,收益率越高,但由于当前虚拟电厂建设成本仍处于高位,成本回收周期变化不大;③ 现货市场启动后将较调峰交易显著缩短成本回收周期;④ 全部时段参与调频、高价时段参与现货表现出较好的经济效益。

4 结论

为了探索影响虚拟电厂经济效益的敏感因素,

本文基于我国推进虚拟电厂参与市场化交易的现实需要,构建了虚拟电厂经济效益模型,并讨论分析了虚拟电厂参与多种市场化交易品种对经济效益产生影响的敏感因素。

虚拟电厂的经济效益往往涉及投资建设成本、运营成本、市场化购电成本和市场化收益等多个方面,与虚拟电厂内部聚合资源、参与的交易品种密切相关,对经济效益的敏感度分析方法已经成为虚拟电厂规划、建设、落地及运营需要面临的关键技术问题。

虚拟电厂无论是通过单一交易获取收益,还是参与多种交易组合的模式,为优化经济效益,应尽可能多地将可控资源投入收益较高的交易品种。通过衡量外部价格与内部价格水平,在外部价格显著低于内部价格或较为稳定的阶段,将剩余资源全部投入,可规避价格波动产生的收益风险,稳定成本回收。

参考文献:

- [1] 王红晋. 加快构建新型电力系统[EB/OL]. (2021-08-04) [2022-04-27]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1707124996256190580&wfr=spider&for=pc>. WANG Hongjin. Accelerating development of a new type of power systems [EB/OL]. (2021-08-04) [2022-04-27]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1707124996256190580&wfr=spider&for=pc>.
- [2] 杨建林, 吕冉, 张铭. 不同基础配置的虚拟电厂内部资源组合策略研究[J]. 电力需求侧管理, 2020, 22(1): 4-9. YANG Jianlin, LYU Ran, ZHANG Ming. Research on the internal resource aggregation strategy of virtual power plants based on different basic configurations [J]. Power Demand Side Management, 2020, 22(1): 4-9.
- [3] 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): 2 874-2 882. LYU 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 CSEE, 2018, 38(10): 2 874-2 882.
- [4] 王立平, 邹朋, 周全, 等. 基于水光互补的多个虚拟电厂两阶段优化调度方法[J]. 供用电, 2022, 39(3): 92-98. WANG Liping, ZOU Peng, ZHOU Quan, et al. Two-stage optimized scheduling method of multiple virtual power plants based on hydro-solar complementary [J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(3): 92-98.
- [5] 刘立洲, 龚锦霞. 基于改进 Shapley 算法的虚拟电厂博

- 弈模型分析[J/OL]. 电测与仪表:1-7, (2020-12-29) [2022-04-27]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20201228.1527.015.html>.
- LIU Lizhou, GONG Jinxia. Game model analysis of virtual power plant based on improved Shapley algorithm[J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation:1-7, (2020-12-29) [2022-04-27]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20201228.1527.015.html>.
- [6] 余思雨. 虚拟电厂多时间尺度内部优化调度与利益均衡[D]. 北京:华北电力大学,2021.
- YU Siyu. Multi-time scale internal optimal dispatch and benefit balance of virtual power plant[D]. Beijing:North China Electric Power University, 2021.
- [7] 宋大为,尹硕,何洋,等. 基于虚拟电厂的多元小微主体参与现货市场的竞价策略[J]. 南方电网技术,2021,15(9):75-84.
- SONG Dawei, YIN Shuo, HE Yang, et al. Bidding strategy of multiple small and micro entities participating in the spot market based on virtual power plant[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(9):75-84.
- [8] 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.
- [9] 李嘉媚,艾芊,殷爽睿. 虚拟电厂参与调峰调频服务的市场机制与国外经验借鉴[J]. 中国电机工程学报,2022,42(1):37-54.
- LI Jiamei, AI Qian, YIN Shuangrui. Market mechanism and foreign experience of virtual power plant participating in peak-regulation and frequency-regulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1):37-54.
- [10] 栗然,丁星,孙帆,等. 风险导向下基于成本效益分析的多投资商虚拟电厂容量配置模型[J]. 电力自动化设备,2021,41(1):145-150.
- LI Ran, DING Xing, SUN Fan, et al. Risk-oriented capacity configuration model for multi-investor virtual power plant based on cost-benefit analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(1):145-150.
- [11] 韩磊. 基于成本效益分析的分布式电源规划[D]. 长沙:长沙理工大学,2010.
- HAN Lei. Distributed generation planning based on cost-benefit analysis[D]. Changsha:Changsha University of Science & Technology, 2010.
- [12] 毛田,黄宁馨,程韧利,等. 虚拟电厂效益评价指标体系构建及其范例分析[J/OL]. 南方电网技术:1-8, (2022-03-09) [2022-04-27]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1643.TK.20220308.1426.002.html>.
- MAO Tian, HUANG Ningxin, CHENG Renli, et al. Construction for the benefit evaluation index system of virtual power plant and its example analysis[J/OL]. Southern Power System Technology:1-8, (2022-03-09) [2022-04-27]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1643.TK.20220308.1426.002.html>.
- [13] 李建林,屈树慷,周毅,等. 双碳目标下储能电站相关技术分析[J]. 电器与能效管理技术,2021(11):8-14.
- LI Jianlin, QU Shukang, ZHOU Yi, et al. Technology analysis on energy storage power station under double carbon target[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2021(11):8-14.
- [14] 刘畅,李德鑫,吕项羽,等. 储能电站商业运营模式探索及经济性分析[J]. 电器与能效管理技术,2020(10):16-20.
- LIU Chang, LI Dexin, LYU Xiangyu, et al. Business model research and economic analysis of energy storage power station[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2020(10):16-20.
- [15] 贺鸿杰,张宁,杜尔顺,等. 电网侧大规模电化学储能运行效率及寿命衰减建模方法综述[J]. 电力系统自动化,2020,4(12):193-202.
- HE Hongjie, ZHANG Ning, DU Ershun, et al. Review on modeling method for operation efficiency and lifespan decay of large-scale electrochemical energy storage on power grid side[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 4(12):193-202.
- [16] 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.
- [17] 张卫国,宋杰,杨璐彤,等. 考虑电动汽车充电需求的虚拟电厂负荷均衡管理策略[J]. 电力系统自动化,2022,46(9):118-126.
- ZHANG Weiguo, SONG Jie, YANG Lutong, et al. Load balancing management strategy for virtual power plants considering charging demand of electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(9):118-126.

作者简介:

高政南(1981),男,内蒙古呼和浩特人,博士,高级工程师,主要从事电力市场方面的工作;

刘康平(1981),男,内蒙古呼和浩特人,高级工程师,主要从事电力市场方面的工作。

(责任编辑 史倩芸)