

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2023.06.011

市场化发电容量补偿机制探索与试点

Exploration on market-driven capacity compensation mechanism

冯丽,刘波,韩震宇,张萌雨

FENG Li, LIU Bo, HAN Zhenyu, ZHANG Mengyu

(重庆电力交易中心有限公司,重庆 400014)

(Chongqing Power Exchange Center Company Limited, Chongqing 400014, China)

摘要: 新能源和电力现货市场的快速发展使燃煤机组的功能定位发生转变,进而引发了成本搁浅问题。为保障电力系统的容量充裕度,确保电网运行和电力供应安全,市场需要引入容量补偿机制。设计了以市场激励为目标的发电容量补偿机制,讨论了容量补偿机制的执行流程,提出了配套的清算、考核、调整和信息披露等机制,并开展了测算分析,可为国内火电机组发电容量成本回收机制的设计提供参考。

关键词: 燃煤机组;容量补偿机制;成本回收;电力市场;缺额成本;容量补偿清算

中图分类号:TK 01:TM 73

文献标志码:A

文章编号:2097-0706(2023)06-0081-06

Abstract: With the development of renewable energy and electricity spot market, the functional repositioning of coal-fired units leads to stranded costs. To ensure sufficient generation capacity adequacy and reliable operation of the power system, a capacity compensation mechanism need to be introduced to power market. A capacity compensation mechanism aiming to provide electricity market incentives is designed. summarizing the implementation process of the capacity compensation mechanism, the assorted clearing, assessment, adjustment, and information disclosure mechanism. The analysis results provide a reference for other provinces exploring capacity cost recovery mechanisms.

Keywords: coal-fired units; capacity compensation mechanism; cost recovery; electricity market; cost deficit; capacity compensation clearing

0 引言

“双碳”目标下,依托传统能源保障电力供应、依托新能源调整电量结构已经成为能源行业的共识,能源结构转型对电力系统运行灵活性、供电可靠性和充裕性提出了更高要求^[1-2]。2022年8月,全国平均气温达到1961年以来历史同期最高水平,拉动制冷负荷快速增长,当月居民生活用电量同比增长33.5%,其中,重庆、湖北、四川、浙江等地增幅均超过50%。电网保供问题突出,发电容量充裕度成为制约电网长期稳定发展的重要因素^[3-5]。

目前,我国正处于电力现货市场建设初期,现货市场设计中多采用基于节点边际电价的全电量优化模式,边际电价仅反映边际机组的短期运行成本,火电机组以可调度容量保障新能源消纳产生的

外部成本则无法完全得到回报^[6-7]。近年来,国家相关部门发文提出要因地制宜建立容量成本回收机制,保障电力供应安全。

国内外已有大量关于保障发电机组固定成本回收机制的研究和实践。文献[8-10]对比了典型的发电容量充裕性机制,提出了我国电力市场的建设思路。文献[11]结合发电容量充裕性评估方法和边际成本定价原理,设计了一种发电容量充裕性保障机制。文献[12-14]综述了国外电力容量补偿机制及运行原理,对其优缺点进行了比较,并提出了适用于我国的电力容量补偿机制。文献[15]梳理了我国煤电容量机制的现状和问题,指出战略备用机制的良好适用性,提出了考虑战略备用的发电容量充裕性机制。现有研究容量充裕性机制的文献多集中在介绍不同机制的设计原理和具体规则上,较少考虑充裕性机制与市场其他相关环节的关系以及实际操作流程。

本文将针对发电容量补偿机制测算、执行和实施各环节,分析实操过程中面临的问题,提出建立

基金项目: 国网重庆市电力公司科技项目(SGCQJY00SCWT2100013)

State Grid Chongqing Electric Power Company Foundation (SGCQJY00SCWT2100013)

该机制的相关配套机制。最后,对容量补偿机制进行测算分析,说明容量补偿机制对用户侧电价的影响。

1 国内外发电容量保障机制

1.1 国外发电容量保障机制

发电容量成本的典型回收方式可分为稀缺定价、容量市场和容量补偿3类。

1.1.1 稀缺定价

美国得州、澳大利亚等地采用的是稀缺定价机制^[16-17],在系统电能和备用稀缺的情况下提高电价,发电商通过单一电能量市场中的尖峰价格来回收投资成本。澳大利亚价格上限为13 800澳元/(MW·h),得州价格上限初期为1 000美元/(MW·h),后续逐步上涨到9 000美元/(MW·h)。稀缺电价仅反映了短时的供需,对电源投资激励不足,会给系统长期容量充裕以及发电投资带来较大的风险,并且会造成市场价格大幅波动。

1.1.2 容量市场

美国宾夕法尼亚-新泽西-马里兰州(PJM)、英国等国家和地区设计了容量市场^[18-20],它以市场竞争的方式形成容量价格,实现发电容量成本回收,是竞争性电力市场的组成部分。PJM区域内可用自然容量必须参加竞拍,中标机组获得容量收益,历年容量市场出清价格波动范围为10~60美元/(kW·a)。容量市场的基础是长期供需关系和长期充裕性评估。市场中需要对报价、出清进行严格的市场力监控。

1.1.3 容量补偿

智利、阿根廷、西班牙等国家采用了容量补偿机制^[21],该机制是在政府相关主管部门的指导下,通过对单位容量补偿标准和各发电机组可补偿容量的核算,实现对发电容量成本的合理补偿。它采取容量电价提前确定、充裕容量事后核算的方式,有利于稳定发电企业收入预期。智利容量补偿水平在每月6~10美元/kW范围内波动。

针对我国现阶段的国情和市场建设状况,容量补偿机制建设风险较低,易于实现计划到市场的平稳过渡。

1.2 国内发电容量保障机制

目前,国内广东、山东、上海等省(市)均在开展容量补偿的初步研究探索。

2020年,广东省提出对在运燃煤、燃气机组实施容量补偿,补偿标准为0.08~0.12元/(kW·h),对售电公司和批发大用户实际用电量之和超出持有的中长期合约外的电量收取容量补偿电费。

2021年,山东省规定参与电力现货市场的燃煤发电机组、新能源、独立储能等可通过容量补偿价

格回收固定成本。用户侧容量电费标准为0.099 1元/(kW·h);2022年进一步完善了容量补偿分摊方式,引入参数峰谷比,以引导用户“移峰填谷”。

2022年,上海市容量发电成本回收机制(现货模拟试运行版)提出了2种补偿方式。(1)对燃气机组采取了类似容量市场的方式,政府主管部门确定燃气发电目标容量和需求曲线,燃气机组集中竞价出清形成燃气机组容量电价,将政府的燃气补贴转变为市场分摊;(2)对其他类型机组采取容量补偿方式,政府根据缺额成本核定补偿电价。

目前发电容量补偿的主要做法为:针对在运机组固定成本回收中的缺额成本,以会计成本法核定容量电价;容量补偿费用与实际用电量和发电量挂钩,支付时采取“以收定支”的方式。基于机组缺额成本确定容量电价的方式比较适用于以市场竞争确定容量价格的情形,因为高成本机组在电能量市场不具备竞争力,其缺额成本较大,这类机组在容量市场也较难足额回收容量成本,因此可以通过市场竞争引导高效机组的投资和发展。但在容量补偿方式下,高成本机组按缺额成本获得补偿可能削弱市场竞争,文献[14]提出通过计算平均缺额成本引入竞争。此外,在现有机制设计中均未考虑容量履约的约束,欠缺对保障发电容量的管理措施。

我国各省发电资源类型区别较大,应根据各省实际建立适应的容量补偿机制,机制设计应激励发电商提高发电效率从而获得更大利润,从而促进发电资源高效利用和有效投资。实施过程中应采取由易到难、分阶段实施的方式,保障机制有效落地。

2 电容量保障机制设计

容量补偿应反映发电机组的可用性,体现系统容量稀缺状况和各发电机组对系统可靠性的实际价值。现阶段,受电煤价格上涨和市场化交易价格变化影响,燃煤发电亟待解决固定成本回收问题。初期可以燃煤发电容量补偿起步,逐步扩展至其他电源类型。

2.1 容量补偿价格

从经济学意义上讲,边际成本定价可以使全社会经济效益最大化。长期边际容量成本是基于中长期负荷预测和一定供电可靠性水平计算的,为满足单位负荷增长需增加发电容量单位投资成本,即可根据系统峰荷期间的边际机组单位投资成本确定系统容量补偿价格。

由于机组成本数据较难准确获取,考虑到容量补偿机制与发电投资规划暂未挂钩,且新投机组规划设计时已计及满足负荷增长的投资效率,为了便

于基础数据的收集和核定,采取如下简化处理。首先根据电能量市场边际机组确定核算容量补偿价格的机组类型,再以容量交付年新增该类机组单位投资成本作为全系统的发电容量补偿价格的计算基准。若无该类新增机组,则将截至容量交付年最近一次投运的该类机组的单位投资成本作为计算基准。

$$p_c^0 = R \times I_t, \quad (1)$$

$$R = \left[\int_1^n e^{-0.1t} dt \right]^{-1} = \frac{i \times (1+i)^n}{(1+i)^n - 1}, \quad (2)$$

式中: p_c^0 为容量补偿价格; I_t 为边际机组单位容量投资成本; R 为投资回收系数,是指在预定的回收期内,按指定的折现率每年回收额占投资额的比率; i 为折现率,参考核定发电上网电价水平时的折现率取6.5%; n 为回收年限,取20年; t 为年份。

以新投机组的单位投资成本作为边际容量成本,投资成本监审难度低,可有效避免市场成员做高投资成本。在此方式下,高成本机组获得的补偿减少,低成本机组获得的补偿增多,有利于促进机组间的良性竞争。

在边际成本法核价方式下,非边际机组固定成本未足额回收时,需要通过电能市场竞争获取收益。发电企业可通过降低运维成本、提供更高可用容量、增加发电量和辅助服务收益来提升收益。

2.2 有效容量

发电容量补偿是对为保障系统容量充裕度、提供容量支撑的有效容量给予补偿。有效容量核定时,综合考虑不同类型机组的厂用负荷、计划检修、非计划停运和自身原因导致的机组容量受阻、系统供需关系等因素,依据历史数据(暂取3年)进行核算。

对于已完成折旧的机组,其固定成本在原有标杆电价机制下已得到回收,不应再对其固定成本进行补偿,仅需考虑基本运行成本。因此,对已完成折旧机组应合理设置折扣系数,折旧年限取20年。

2.2.1 常规机组

$$P_{va} = \min(P_{inv} \times K_0, P_N), \quad (3)$$

$$P_{inv} = P_N \times (1 - R_p) \times K_{ac}, \quad (4)$$

$$K_{ac} = (T_y - T_{ua} - T_{lim})/T_y, \quad (5)$$

$$T_{lim} = \sum P_{lim} \times t_{lim} / P_N, \quad (6)$$

式中: P_{va} 为机组有效容量; P_{inv} 为机组可调容量; P_N 为机组额定容量; R_p 为厂用电率; K_{ac} 为等效可用系数,该系数扣除了因计划检修、非计划停运和自身原因导致的容量受限等因素致使机组处于不可用状态持续的时长,取前3年均值; T_y 为统计年时长; T_{lim} 为

不可用停机时长; T_{lim} 为统计年内因自身原因导致的容量受限的等效停运总时长; t_{lim} 为每次功率受限时长; P_{lim} 为每次受限功率值; K_0 为容量需求调节系数,为容量交付年系统最大负荷(含系统备用容量)与全市发电资源可调容量加最大外购电力的比值。 K_0 反映了系统供需情况,每年由政府部门设置,为避免过补偿,应设置合理的 K_0 上限。

2.2.2 独立储能

独立储能属于短时调节型电力资源,主要通过快速爬坡、调频辅助服务等交易获得调节价值收益。鉴于现阶段辅助服务市场暂未有相应的交易品种,可采取容量补偿方式保障其一定的固定成本回收,但补偿时应确定独立储能对系统容量充裕度、系统负荷支撑的有效性。

$$P_{vas} = P_{ds} \times T_{de} \times D_{OD} \times K_{acs} \times K_0, \quad (7)$$

$$K_{acs} = \left(\sum T_{ND} - \sum T_{LOT} \right) / P_N, \quad (8)$$

式中: P_{vas} 为独立储能有效容量; P_{ds} 为额定功率; T_{de} 为标称放电时间下的放电效率; D_{OD} 为放电深度; K_{acs} 为储能年等效可用系数,该系数应综合考虑储能可用放电时长、设备检修、故障停运等因素; T_{ND} 为标称放电时长,是储能设施每天1个充放电循环下,以额定功率放电的时长; T_{LOT} 为不可用/停运时长。

2.3 容量补偿费用支付及分摊

为保证发电主体稳定获得月度容量补偿费用,采取发、用两侧解耦方式。

各发电主体依据年度核定的容量补偿价格及各自的有效容量获得容量补偿费用,容量补偿费用在容量交付年按月向发电主体支付。新投(退役)发电主体的容量补偿费用按照投产(退役)时间进行折算。

用户侧按照月度实际用电量和分摊价格,按月结算电费。用电侧分摊价格依据发电侧年度容量补偿总费用和容量支付年预计的市场化工商业用户总电量计算。

$$F_c = \left(\sum P_{va} + \sum P_{vas} \right) \times p_c^0, \quad (9)$$

$$p_{cs} = F_c / Q_c, \quad (10)$$

式中: F_c 为年度总容量补偿费用; p_{cs} 为用户侧分摊度电价格; Q_c 为预估年度市场化工商业总用电量。

2.4 容量补偿配套机制

为保证容量补偿机制执行过程中各环节有效衔接,同时激励发电主体参与市场竞争,提升容量可靠性,需要设计相关机制,具体流程如图1所示。

2.4.1 容量考核机制

近年来,为了促使发电资源完成容量履约,提高容量可靠性,PJM、美国新英格兰地区电力市场

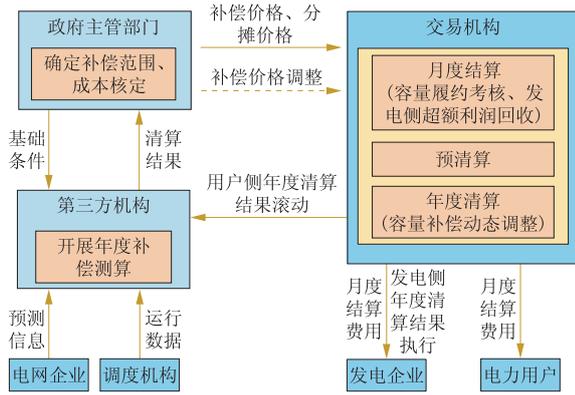


图1 容量补偿业务流程示意

Fig. 1 Capacity compensation mechanism

(ISO-NE)从2020年起开始对机组的容量表现进行考核^[22-23]。美国中西部电力市场(MISO)、美国西南电力联营公司(SPP)也在讨论类似的举措^[23-25]。目前《发电厂并网运行管理实施细则》和《并网发电厂辅助服务管理实施细则》(以下简称“两个细则”)中采取的是与发电量挂钩的考核机制,未体现机组的容量义务。在新形势下,燃煤发电逐渐由电量主体转变为调节主体,基于发电量的考核方式有必要调整为基于容量义务的考核方式。

本文设计了基于容量履约的考核方法,当机组提供的有效容量低于测算时的有效容量值时,需返还对应的容量补偿费用并进行考核,初期可按年度考核,或者对容量紧缺时段执行考核。发电机组已执行容量考核时,应在“两个细则”非计划停运考核中予以扣减,避免重复考核。

$$F_A = F_c \times K_{ac} \sum_{i=1}^3 K_{aci} \times k_{af}, \quad (11)$$

式中: F_A 为考核费用; k_{af} 为容量偏差系数($0 < k_{af} < 1$); K_{aci} 为第*i*年的有效容量可用率。

储能设施主要是作为价格响应者,对未按预期提供容量的机组严格执行考核,在现货市场运行初期可考虑约定持续放电时间范围和时长下限值,后续根据现货市场实际运行情况再行调整。

2.4.2 容量补偿清算机制

在市场化快速推进期,发电主体和用电规模变化较大,容量补偿价格应采用年度核算的方式。为保障年度发电侧容量补偿价格和用户侧度电分摊价格水平不变,结算时采取发、用两侧解耦的方式,按年开展清算。

本文设计了2轮清算制:(1)每年11月启动次年容量补偿价格核算前需开展预清算,主要是清算因用电规模预测偏差造成的补偿费用偏差,并将其纳入次年容量补偿分摊度电价格中;(2)次年1月对发、用两侧实际执行情况开展年度清算,包括发/用

两侧补偿费用偏差、机组省间现货和应急外送等外送电量、容量考核费用等。发电侧清算费用在次年月度支付的容量费用中扣除,用电侧的清算费用可滚动纳入后一年的容量补偿费用分摊度电价格中。

2.4.3 容量补偿动态调节机制

为保证容量补偿有效实施,应统筹机组在电能量、辅助服务、容量补偿等方面的总收益,根据燃料价格、国家政策、供需变化等情况,跟踪分析发电机组固定成本回收情况,立足地区经济发展实际,确保用户电价波动范围可控,可由政府部门设置容量补偿价格调整范围,保障发电基本运营有序,引导发电容量投资。为保证动态调节机制有效执行,需要完善相应的成本监审机制,由政府部门指定第三方机构定期开展发电机组成本核定。

2.4.4 信息披露机制

容量补偿的目的是通过保障存量机组生存、引导新增发电资源的投资和发展来解决系统容量长期充裕度不足。不同的容量补偿方式有相应的信息披露机制,用以控制市场风险^[8]。现阶段电力现货市场的信息披露主要针对现货运营期的电网和市场信息,缺乏对未来规划类的信息披露。实施容量补偿后,应对中长期的容量充裕度评估、备用水平预测、各类型资源平均投资水平等信息进行披露,提供有效的中长期信息,引导市场主体合理投资决策。初期,可对3~5年的基本评估信息进行滚动披露,具备较好预测条件后逐渐扩展至更长时段的预测评估信息披露。

3 算例分析

基于某省2022年燃煤机组的平均固定成本和变动成本水平,不考虑发电机组报价策略、辅助服务等其他市场收益和电煤价格等方面的变化,测算机组固定成本回收情况。算例中3类典型机组参数见表1(固定成本含年化投资固定和运行成本)。

表1 算例机组参数

Table 1 Unit parameters of case system

煤电机组	容量/MW	变动成本/[万元·(MW·h) ⁻¹]	固定成本/[万元·MW ⁻¹]	投资回收期/a
1	1 000	273	305	20
2	600~660	297	404	20
3	300~360	314	490	20

以某新增660 MW燃煤机组的单位投资成本为基准计算的容量补偿价格为316元/(kW·a),图2给出了2023—2030年发电侧容量补偿价格和用户侧度电分摊价格的变化情况。随着市场化总用电量增加,容量补偿费用在用户侧分摊价格逐年下降,

总体变化范围为0.03~0.05元/(kW·h)。综合考虑燃气、抽水蓄能等其他类型机组投产、外购电、部分老旧燃煤机组退役、燃煤发电量逐年下降的情况,容量补偿费用折算到发电侧的补偿价格先升后降,波动范围为0.06~0.09元/(kW·h)。

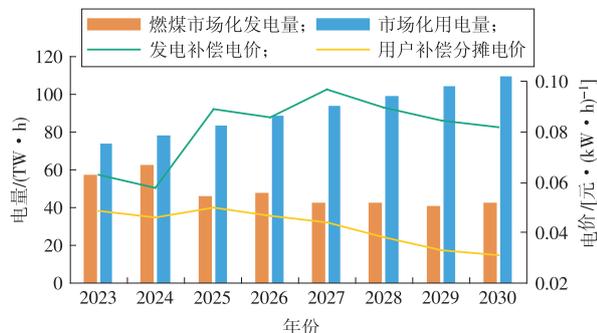


图2 2023—2030年容量补偿价格变化情况

Fig. 2 Price of capacity compensation variation from 2023 to 2030

采取容量补偿后,为了兼顾非边际机组固定成本回收和提升市场竞争度,可适当放宽电能量市场限价范围,图3给出了2023—2030年燃煤发电机组容量补偿费用和固定成本回收情况。前期燃煤发电小时数较高,其固定成本回收率在90%左右;2025年后,受能源结构变化影响,当燃煤发电小时数下降时,若电煤价格仍维持在目前高位,燃煤发电固定成本回收率将下降至70%左右。发电企业在电能量市场外,还需要通过辅助服务等其他交易品种获取收益,若仍然存在固定成本回收不足,可调整容量补偿价格,保障机组固定成本合理回收。

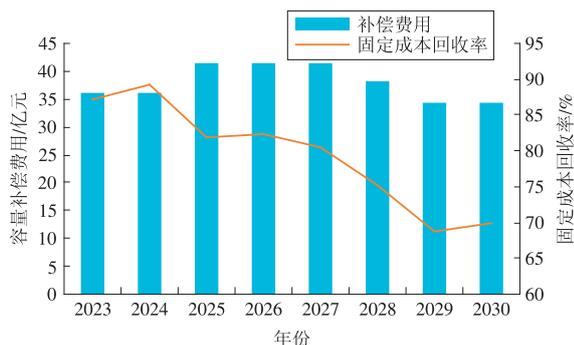


图3 2023—2030年燃煤机组固定成本回收率

Fig. 3 Fixed cost recovery rate of coal-fired generator from 2023 to 2030

4 结论

保障发电容量长期充裕性是电力市场设计中需要考虑的一个重要环节,在“双碳”背景下,容量补偿机制变得更加重要。容量补偿机制设计中应兼顾其与其他市场的衔接关系,充分评估对发电成本合理疏导和用户电价水平的影响,以及与现行电价机制、电能量市场、“两个细则”等的协同关系。

本文首先介绍了国内外容量充裕性机制,在此基础上,以市场激励为目标,提出了容量补偿机制设计各环节需考虑的关键问题,并提出了具体措施。为保证发电容量补偿机制有效实施,给出了容量补偿操作流程,并提出了完善相应配套机制的基本思路,包括结算清算机制、考核机制、信息披露机制、动态调节机制等。最后开展了测算分析,结果表明容量补偿对发/用两侧影响可控,相关做法可为国内容量成本回收机制探索提供参考。后续还需进一步考虑新能源装机、市场政策变化的影响,结合发电企业实际盈利水平开展深入测算分析。

参考文献:

- [1]MILLIGAN M, FREW B A, BLOOM A, et al. Wholesale electricity market design with increasing levels of renewable generation: Revenue sufficiency and long-term reliability [J]. *Electricity Journal*, 2016, 29(2): 26–38.
- [2]喻小宝,郑丹丹,杨康,等.“双碳”目标下能源电力行业的机遇与挑战[J]. *华电技术*, 2021, 43(6): 21–32.
YU Xiaobao, ZHENG Dandan, YANG Kang, et al. Opportunities and challenges faced by energy and power industry with the goal of carbon neutrality and carbon peak [J]. *Huadian Technology*, 2021, 43(6): 21–32.
- [3]ITO M, TAKANO A, SHINJI T, et al. Electricity adjustment for capacity market auction by a district heating and cooling system[J]. *Applied Energy*, 2017, 206: 623–633.
- [4]GALETOVIC A, MUÑOZ C M, WOLAK F A. Capacity payments in a cost-based wholesale electricity market: The case of Chile [J]. *The Electricity Journal*, 2015, 28 (10) : 80–96.
- [5]BHAGWAT P C, MARCHESELLI A, RICHSTEIN J C, et al. An analysis of a forward capacity market with long-term contracts[J]. *Energy Policy*, 2017, 111: 255 – 267.
- [6]武昭原,周明,王剑晓,等.激励火电提供灵活性的容量补偿机制设计[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(6): 43–51.
WU Zhaoyuan, ZHOU Ming, WANG Jianxiao, et al. Mechanism design of capacity payment for incentivizing flexibility of thermal power [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(6): 43–51.
- [7]陈大宇. 电力现货市场配套容量机制的国际实践比较分析[J]. *中国电力企业管理*, 2020(1): 30–35.
CHEN Dayu. Comparison and analysis of international practice of capacity mechanism in spot electricity market[J]. *China Power Enterprise Management*, 2020(1): 30–35.
- [8]喻芸,荆朝霞,陈雨果,等. 电力市场环境下典型发电容量充裕性机制及对我国的启示[J]. *电网技术*, 2019, 43 (8): 2734–2742.
YU Yun, JING Zhaoxia, CHEN Yuguo, et al. Typical

- generation resource adequacy mechanism in electricity market and enlightenment to China [J]. *Power System Technology*, 2019, 43(8): 2734-2742.
- [9] 黄海涛, 许佳丹, 郭志刚. 发电容量充裕性保障机制国际实践与启示[J]. *中国电力*, 2023, 56(1): 68-76.
HUANG Haitao, XU Jiadan, GUO Zhigang. International Practice of generation capacity adequacy guarantee mechanism and its implications for China's electricity market[J]. *Electric Power*, 2023, 56(1): 68-76.
- [10] 郭乐, 张丹丹. 几种基于可靠性指标的容量支持机制电力市场分析[J]. *华电技术*, 2019, 41(11): 12-17.
GUO Le, ZHANG Dandan. Analysis on several capacity support mechanisms in electric market based on reliability index[J]. *Huadian Technology*, 2019, 41(11): 12-17.
- [11] 张粒子, 许通, 宋少群, 等. 电力市场中发电容量充裕性评估方法及保障机制[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(18): 55-63.
ZHANG Lizi, XU Tong, SONG Shaoqun, et al. Evaluation method and guarantee mechanism of power generation capacity adequacy [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(18): 55-63.
- [12] 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): 1782-1789.
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): 1782-1789.
- [13] 孙启星, 尤培培, 李成仁. 适应中国现行电力市场环境下的容量市场机制设计[J]. *中国电力*, 2022, 55(8): 196-201.
SUN Qixing, YOU Peipei, LI Chengren. Capacity market mechanism design under electricity market mechanism in China[J]. *Electric Power*, 2022, 55(8): 196-201.
- [14] 王一, 朱涛, 张玉欣, 等. 适应中国电力现货市场发展的容量补偿机制初探[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(6): 52-61.
WANG Yi, ZHU Tao, ZHANG Yuxin, et al. Preliminary study on capacity compensation mechanism adapted to development of electricity spot market in China [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(6): 52-61.
- [15] 王鹏, 杜瑜铃, 王雁凌. 欧洲战略备用机制对我国发电容量充裕性问题的启示[J]. *电力建设*, 2022, 43(10): 16-25.
WANG Peng, DU Yuling, WANG Yanling. Enlightenment of European strategic reserve mechanism on the adequacy of power generation capacity in China [J]. *Electric Power Construction*, 2022, 43(10): 16-25.
- [16] Texas Coalition for Affordable Power. ERCOT experiences record consumption, real-time prices reach 9 000 dollar cap [EB/OL]. (2019-08-14) [2022-12-11]. <https://tcaptx.com/industry-news/ercot-real-time-prices-hit-record-9000-mark>.
- [17] 朱继忠, 喻芸, 谢平平, 等. 美国稀缺定价机制及对我国现货市场建设的启示[J]. *南方电网技术*, 2019, 13(6): 37-43, 75.
ZHU Jizhong, YU Yun, XIE Pingping, et al. Scarcity pricing of United States and its enlightenment to China [J]. *Southern Power System Technology*, 2019, 13(6): 37-43, 75.
- [18] BOWRING J. Capacity markets in PJM [J]. *Economics of Energy & Environmental Policy*, 2013, 2(2): 47-64.
- [19] STODDARD R, ADAMSON S. Comparing capacity market and payment designs for ensuring supply adequacy [C]// 42nd Hawaii International Conference on System Sciences. Waikoloa, USA. IEEE, 2009: 1-8.
- [20] ISLAM M, REN X Q, REN S L, et al. A spot capacity market to increase power infrastructure utilization in multi-tenant data centers [J]. *Performance Evaluation Review*, 2017, 45(1): 19-20.
- [21] JOSKOW P L. Capacity payments in imperfect electricity markets: Need and design [J]. *Utilities Policy: Strategy, Performance, Regulation*, 2008, 16(3): 159-170.
- [22] PJM. Capacity performance assessment intervals [EB/OL]. (2019-10-28) [2022-12-11]. <https://pjm.com/-/media/about-pjm/newsroom/fact-sheets/cp-performance-assessment-intervals.ashx>.
- [23] ISO-NE. Introduction to ISO-NE forward capacity market (FCM) pay-for-performance (PFP) [EB/OL]. (2018-06-14) [2022-12-11]. <https://www.iso-ne.com/static-assets/documents/2018/06/2018-06-14-egoc-a4.0-iso-ne-fcm-pay-for-performance.pdf>.
- [24] Potomac Economics. Summary of 2019 MISO state of the market report [R]. Fairfax, USA, 2020.
- [25] GREG W. State of the market 2019 [R]. Little Rock, USA: Southwest Power Pool Inc, 2020.

(本文责编:陆华)

收稿日期: 2022-12-23; 修回日期: 2023-02-20
 上网日期: 2023-06-25; 附录网址: www.iienenergy.cn

作者简介:

冯丽(1975), 女, 正高级工程师, 博士, 从事电力市场规划与运营、电力系统自动化等方面的研究, beth002@sina.com;

刘波(1970), 男, 高级工程师, 从事电力系统运行与控制、电力市场运营方面的工作, lb@cq.sgcc.com.cn;

韩震宇(1982), 男, 工程师, 从事电力市场运营分析、电力市场规划设计方面的工作, hanzy@cq.sgcc.com.cn;

张萌雨(1989), 女, 工程师, 从事电力市场服务、售电市场管理方面的工作, zhangmengyu@cq.sgcc.com.cn。