

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2022.09.010

浙江调频辅助服务市场机制设计及运营实践

Mechanism design and operation practice of Zhejiang frequency regulation ancillary service market

唐琦雯¹, 沈琪², 祝俊³, 苏宜靖¹
TANG Qiwen¹, SHEN Qi², ZHU Jun³, SU Yijing¹

(1. 国网浙江省电力有限公司电力调度控制中心, 杭州 310007; 2. 杭州半山发电有限公司, 杭州 310060; 3. 中国三峡建工(集团)有限公司浙江分公司, 杭州 310052)

(1. Power Dispatching Control Center of State Grid Zhejiang Electric Power Company Limited, Hangzhou 310007, China; 2. Hangzhou Banshan Power Generation Company Limited, Hangzhou 310060, China; 3. China Three Gorges Construction Engineering Corporation Zhejiang Branch, Hangzhou 310052, China)

摘要:“双碳”目标下构建以新能源为主体的新型电力系统,大规模、高比例新能源并网对电力系统调节能力提出更高的要求。为激励发电机组提升调节能力,逐步引入优质调频资源,优化调频资源配置,研究建立浙江调频辅助服务市场机制,在满足系统调频需求的条件下,综合考虑电能市场和调频服务成本,以计入机会成本的调频总成本最小化为目标,建立电能-调频市场联合优化的出清模式,以调频申报、机会成本和调频性能指标等因素决定优质资源的选取,并按实际调频贡献和调频效果支付费用。浙江调频市场的运行结果表明,市场出清机制对筛选优质资源、降低调频成本、提升调频性能以及增加收益来源等方面都起到了积极的作用。最后总结经验并对未来辅助服务市场的发展完善提出了建议。

关键词:碳中和;新型电力系统;调频辅助服务市场;新能源并网;联合优化;机会成本;综合调频性能指标

中图分类号:TK 01:TM 73 **文献标志码:**A **文章编号:**2097-0706(2022)09-0071-07

Abstract: Grid-connection of large-scale and high-proportion new energy makes higher requirement on the regulation capacity of power systems. To improve the regulation performance of generators, high-quality frequency regulation resources are introduced into the establishment of Zhejiang frequency regulation ancillary service market. On the premise of satisfying the regulation requirements of the power system, the market mechanism comprehensively considers the electric power market and regulation service cost, aiming to minimize the total regulation cost included the opportunity cost. The clearing mode of the electricity-regulation joint optimization market takes regulation bidding price, opportunity cost and regulation performance index as the determining factors and makes the payment according to the actual regulation contribution and regulation effect. The operation results of Zhejiang frequency regulation market show that the market clearing mechanism plays a positive role in selecting high-quality resources, reducing regulation cost, improving regulation performance and increasing revenue sources. Based on the summary on experience, suggestions on developing and improving the ancillary service market are put forward.

Keywords: carbon neutrality; new power system; regulation ancillary service market; grid-connection of new energy; joint optimization; opportunity cost; comprehensive regulation performance index

0 引言

当前,我国已明确提出碳达峰、碳中和目标,实现“双碳”目标需要着力构建以新能源为主体的新型电力系统^[1]。《浙江省可再生能源发展“十四五”规

划》指出要实施“风光倍增计划”,到2025年年底浙江可再生能源装机超过50GW,装机占比达到36%以上^[2]。国务院印发的《2030年前碳达峰行动方案》明确到2030年风电、太阳能发电总装机容量达到1200GW以上^[3]。新能源大规模、高比例并网后,由于其发电出力具有波动性和间歇性,“极热无风、晚峰无光”特征明显,大幅增加了电力系统对调频、调峰资源的需求。合理的调频辅助服务市场机制能

收稿日期:2022-06-02;修回日期:2022-08-30
基金项目:国网浙江省电力有限公司青年科技项目(KJQ202101);国家电网有限公司科技项目(5108-202219049A-1-1-ZN)

够准确反映系统调频需求以及调频资源的稀缺程度,对引导市场主体参与电网调节、提升调频性能,促进资源优化配置和新能源消纳有着重要意义。

国外调频辅助服务市场发展较早并不断更新迭代。美国早期的调频补偿机制为单一的容量补偿,随着储能为代表的快速响应调频资源(FRR)的引入,以及系统对快速调节需求的增加,美国能源监管委员会(Federal Energy Regulatory Commission, FERC)在2011年颁布了755号法令^[4],该法令要求修改调频补偿规则,引入基于效果的调频补偿机制。美国许多州引入了新的补偿机制,即除了容量补偿外,还增加了基于实际调频里程和调频效果的补偿机制^[5-7]。新的调频机制下,电储能等快速响应调频资源得到了大规模的发展。

国内调频市场尚处发展阶段。计划模式下,各地能源监管部门基于国家电监会建立的辅助服务补偿机制,结合各区域网架结构、电源、负荷等实际情况,制定相应“两个细则”。“两个细则”对自动发电控制(AGC)、性能指标等有偿调频服务规定了补偿和考核标准。但该模式存在两方面的问题:一方面没有明确调频资源选取和调用的原则,另一方面提供调频服务的机组与普通机组收益差别不大,调频性能好、调节速率大小对机组是否参与调频服务以及调频收益的影响并不大,显然无法适应新型电力系统对调频资源的需求。

新一轮电力体制改革启动以来,国内部分省份出台了调频辅助服务市场建设方案,并结合自身实际和实践不断修改完善。文献[8-9]分别阐明了山西和南方(以广东起步)调频辅助服务市场机制,两省的调频市场以性能和报价两方面因素确定调频资源的选取,并按照实际调频贡献和调频效果支付补偿费用。其中广东调频市场交易频次为每小时出清一次,山西允许机组按高峰、低谷以及新能源大发等5个时段进行申报并出清,两省的调频市场与电能量市场分开独立运行。浙江调频市场在借鉴国外电力市场运营实践和国内调频市场理论研究成果的基础上,形成了独具创新性的电能量-调频联合优化的市场模式。本文重点介绍浙江调频市场机制设计的核心思路,对市场运营实践情况和运营效益进行总结分析,并提出下一步完善调频市场交易机制的建议。

1 调频市场设计关键问题

1.1 调频市场建设的目的

长期以来,浙江电网以“两个细则”为依据,按照固定标准对调频机组进行补偿和考核。随着负

荷快速增长以及新能源大规模并网,电力系统对调频需求大幅提升,“两个细则”固定补偿模式已无法适应新的源荷特性。“十四五”期间浙江全省最高负荷年均增长约6%,预计2025年将达到124.3 GW。截至2021年12月,浙江省新能源装机占比超过20%,仅次于火电成为第2大电源,新能源出力占负荷比重最大达27.88%,光伏日间出力波动超过8 GW,成为影响供电能力最大不确定因素。随着“十四五”期间“风光倍增计划”的实施,预计2025年新能源将达到34 GW。

浙江调频市场建设以报价和性能决定调频资源的调用,实现调频调用的公平合理;以调频表现和贡献来决定收益水平,有利于充分调动调频资源积极性,从而提高系统总调节性能,促进新能源消纳。

1.2 调频市场与电能量市场衔接

电能量-辅助服务联合优化模型可在优化过程中综合考虑发电成本和调频服务成本。在这种模式下,市场能够以最经济的方式保障电能和调频需求,同时提高发电企业参加调频市场的积极性。文献[10-12]提出了调频与电能量联合优化算法及机会成本数学模型。文献[11]从工程应用的角度给出了主辅联合优化简化模型,并以PJM调频市场为例论证了通过机会成本耦合出清能够达到联合优化的效果。

浙江电力现货市场将其整合到现行的电能量调频联合优化模型中,并对机会成本的计算方法进一步简化处理。忽略成本的变化,机会成本的计算公式为

$$C^{OC} = |P_{\text{imp}} - P_{\text{ed}}|, \quad (1)$$

式中: P_{imp} 为调频资源所在节点的节点边际电价; P_{ed} 为调频资源为提供调频服务而运行在非经济出力点,该非经济出力点对应的电能成本。

浙江调频市场将机会成本计入调频总成本后统一优化出清,将不同调频资源因提供调频而损失的电能量市场收益计入出清和结算环节,形成电能量和调频市场的最优组合。

1.3 调频市场关键参数设计依据

在浙江调频市场出清、定价以及结算等环节中,涉及的主要参数包括调频容量报价、调频里程报价、调频机会成本以及综合调频性能指标。其中调频机会成本在1.2节中已展开论述,调频里程和容量的报价依据主要是机组提供调频服务所消耗的成本。调频服务成本包括投资成本、发电效率损失成本、运维成本(VOM)和机会成本(LOC)^[13-19]等。

其中,机组因提供调频而偏离最优工况运行,导致发电效率损失的成本需要通过容量补偿得以回收,而因快速调节产生的运维成本和因调频指令频繁转换导致的热耗增加等成本需要通过调频里程补偿的形式得以回收。因此,浙江调频市场允许市场主体根据调频服务成本分别进行里程价格和容量价格的申报。为了激励市场主体提高调频性能,在调频市场机制设计时,除了考虑报价因素外,也将调频性能指标纳入调频资源的选取标准中。在调频资源集中出清阶段,可根据调频资源的历史调频表现(历史综合调频性能指标)结合其申报的价格进行排序;实际调用后,性能指标应根据其实际表现进行实时测算更新,并以此为依据进行补偿。

2 调频市场组织实施

2.1 调频市场组织形式及定价逻辑概述

浙江调频市场组织流程如图1所示。调度机构在运行日的前一天(简称日前)预测和公布系统调频需求,市场主体根据调频需求申报调频里程价格、调频容量价格和调频容量。时前调频市场中,根据调频资源*i*的综合调频性能指标、里程调整系数等参数对其申报的调频容量价格、调频里程价格进行调整,考虑预估机会成本后得到不同调频资源*i*的调频组合排序价格(k_i^{Per}),根据系统调频需求对调频组合排序价格(P_i^{Per})进行边际出清,确定中标的调频资源。实时运行中,调度机构根据时前调频市场确定的中标资源进行调用。事后根据实际机会成本重新计算不同调频资源*i*的调频定价排序价格,采用边际出清、统一定价方式确定调频里程出清价格和调频容量出清价格,并分别进行结算。

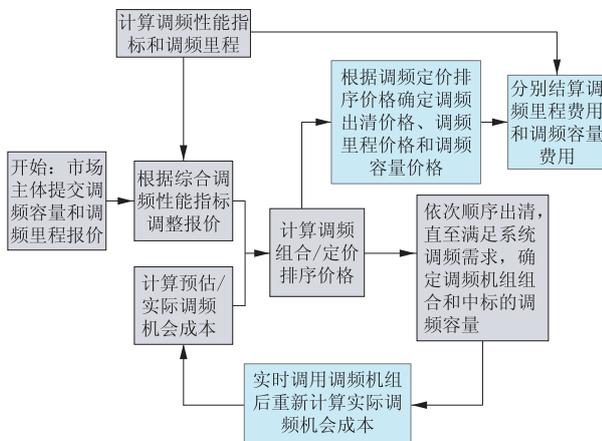


图1 浙江调频市场组织流程

Fig. 1 Organizational structure of a frequency regulation market

2.2 综合调频性能指标评价体系

为激励机组提升调频性能,浙江调频市场采用

综合调频性能指标(以下由 k_i^{Per} 表示)来反映发电单元响应调频指令的综合性能表现,并从3方面对综合调频性能指标进行评价和衡量:调节速率、响应时间和调节精度。即

$$k_i^{\text{Per}} = (\mu_1 \sum_{t=1}^N k_i^{\text{R}} + \mu_2 \sum_{t=1}^N k_i^{\text{D}} + \mu_3 \sum_{t=1}^N k_i^{\text{P}}) / (\mu_1 + \mu_2 + \mu_3), \quad (2)$$

式中: k_i^{R} 为调节速率,反映发电单元响应AGC控制指令的速率; k_i^{D} 为响应时间,反映发电单元响应AGC控制指令的时间; k_i^{P} 为调节精度,反映发电单元响应AGC控制指令的精度; μ_1, μ_2, μ_3 为3个分量的权重因子。根据实际运行经验,调节速率对于调频性能影响最大,因此浙江调频市场中3个分量权重因子分别取 $\mu_1 = 2, \mu_2 = 1, \mu_3 = 1$ 。

为体现不同机组调频性能的差异,对综合调频性能指标进行归一化处理,为

$$\bar{k}_i^{\text{Per}} = k_i^{\text{Per}} / k_{\text{max}}^{\text{Per}}, \quad (3)$$

式中: k_i^{Per} 为第*i*台发电单元的综合调频性能指标; $k_{\text{max}}^{\text{Per}}$ 为所有发电单元的综合调频性能指标中的最大值; \bar{k}_i^{Per} 为归一化之后的综合调频性能指标。

2.3 时前出清

2.3.1 基于综合调频性能指标的调频报价调整

为鼓励市场主体提升调频性能,优化调频资源配置,浙江调频市场基于调频资源的综合调频性能指标对其调频容量报价、调频里程报价和预估机会成本分别进行调整,根据系统调频需求对调频组合排序价格进行边际出清。将综合调频性能指标引入价格体系中,优先选用调频性能好、成本低的调频资源,有利于促进调频资源提升自身调节性能。调整后的调频容量价格、里程价格以及调整后的预估机会成本计算公式如式(4)至式(6)所示。

$$C_i^{\text{RegC}} = \frac{O_i^{\text{RegC}}}{\bar{k}_i^{\text{Per}}}, \quad (4)$$

$$C_i^{\text{RegM}} = \frac{O_i^{\text{RegM}} \alpha_\chi}{\bar{k}_i^{\text{Per}}}, \quad (5)$$

$$C_i^{\text{ad.OC}} = C_i^{\text{OC}} / \bar{k}_i^{\text{Per}}, \quad (6)$$

式中: C_i^{RegC} 为调频资源*i*调整后的调频容量价格; O_i^{RegC} 为调频资源*i*的调频容量报价; C_i^{RegM} 为调频资源*i*调整后的调频里程价格; O_i^{RegM} 为调频资源*i*的调频里程报价; α_χ 为里程调整系数,即系统单位调频容量所对应的调频里程数; $C_i^{\text{ad.OC}}$ 为调频资源*i*调整后的机会成本; C_i^{OC} 为调频资源*i*预估的机会成本。

2.3.2 边际出清

在时前调频市场中,根据调整后的调频容量价格 C_i^{RegC} 、调整后的调频里程价格 C_i^{RegM} 以及调整后的机会成本 $C_i^{\text{ad.OC}}$ 计算得到不同调频资源*i*的调频组合排序价格 P_i^{Per} 为

$$P_i^r = C_i^{\text{RegC}} + C_i^{\text{RegM}} + C_i^{\text{ad,OC}} \quad (7)$$

按照调频资源 i 的排序价格由低到高进行排序,直到中标的调频容量满足系统总的调频需求。

2.3.3 基于成本最小化的里程调整系数

为了使调频里程报价和调频容量报价单位相一致,需引入里程调整系数 α_χ 对里程报价进行调整^[20]。该参数将里程折算成容量来定价,通过里程调整系数 α_χ 对里程报价 O_i^{RegM} 进行调整,与调整后的调频容量报价 C_i^{RegC} 相加,形成的调频组合排序价格 P_i^r 进行边际出清,即能满足总调频成本最小化的目标。为了更好地解释上述出清过程为何能实现调频成本最小化的目标,下面通过拉格朗日优化模型进行推导。

根据原始定义,调频市场优化目标为在满足系统调频需求的条件下,总调频费用最小化,即

$$\min F = \min \sum_{i=1}^{N_c} (r_i^{\text{RegC}} O_i^{\text{RegC}} + r_i^{\text{RegM}} O_i^{\text{RegM}}), \quad (8)$$

式中: r_i^{RegC} 为发电机组 i 中标的调频容量; r_i^{RegM} 为发电机组 i 实际的调频里程; F 为系统的总调频费用; N_c 为调频市场中标的发电机组数。

约束条件为

$$\sum_{i \in I} r_i^{\text{RegM}} \geq r_{\text{MKT}}^{\text{RegM}}, \quad (9)$$

$$r_i^{\text{RegM}} = \alpha_\chi r_i^{\text{RegC}}, \quad (10)$$

式中: $r_{\text{MKT}}^{\text{RegM}}$ 为系统调频总需求。由此得到目标函数为

$$\min F = \min \sum_{i=1}^{N_c} (O_i^{\text{RegC}} + O_i^{\text{RegM}} \alpha_\chi) r_i^{\text{RegC}} \quad (11)$$

浙江调频市场根据历史数据得到每单位容量所提供的调频里程 α_χ , 调频里程报价 O_i^{RegM} 通过 α_χ 系数调整后结合容量报价 C_i^{RegC} 进行集中竞价、边际出清,从而得到调频成本最小化,充分印证了浙江调频市场优化模型的科学性和合理性。

2.4 实时调用及时序衔接

浙江电能市场每 5 min 滚动 1 次,计算未来 75 min 的节点电价。每小时开始前 15 min,时前调频市场启动计算,在时前调频市场启动时,电能市场已计算出未来 1 h 的电能价格,通过式(1)可得调频市场预估机会成本。时前调频市场根据调频里程报价、调频容量报价、里程调整系数和预估机会成本,优化出清得到实时运行时段(1 h)的中标调频资源及中标容量。在实时运行时段内,根据调频中标容量修改机组出力上下限后作为电能市场的约束条件并进行滚动出清,根据电能市场出清结果确定调频资源基准运行点,叠加调频指令后通过 AGC 下发执行。时序衔接如图 2 所示。



图 2 时序衔接

Fig. 2 Sequential connection

2.5 事后定价

每小时开始前 15 min,时前调频市场启动计算,由于此时电能市场尚未正式出清,只能根据电能市场预估的节点电价计算预估机会成本,用于确定调频组合排序价格。待实时调用后,需要根据调频资源 i 的实际表现和调频资源所在节点的实际节点电价 P_{imp} ,重新计算其综合调频性能指标 $\bar{k}_i^{\text{Per}^2}$ 及实际机会成本 $C_i^{\text{ad,OC}^2}$,根据式(4)至式(7)计算得到调频定价排序价格 $P_i^{r^2}$,在所有中标的调频资源中,最高的调频边际定价排序价格即为调频市场的出清价格 P^C 。

浙江调频市场将调频容量与调频里程视为 2 种不同的产品,分别进行定价。根据调频资源综合调频性能指标 $\bar{k}_i^{\text{Per}^2}$ 和调频里程报价 O_i^{RegM} 计算其调频里程价格 $C_i^{\text{RegM}^2} = \bar{k}_i^{\text{Per}^2} \times O_i^{\text{RegM}}$ 。中标的调频资源中,最高的调频里程价格即为调频市场里程出清价格 P^{PC} ,调频市场容量出清价格 P^{CC} 为

$$P^{\text{CC}} = P^C - P^{\text{PC}} \quad (12)$$

2.6 调频市场结算

浙江调频市场采用两部制结算机制,即调频资源 i 的调频容量成本和调频机会成本通过调频容量收益回收,调频里程成本通过调频里程收益回收。对于任一调频资源,其两部制结算公式为

$$R_i^{\text{CC}} = P^{\text{CC}} r_{i,t}^{\text{RegC}} \bar{k}_i^{\text{Per}}, \quad (13)$$

$$R_i^{\text{PC}} = P^{\text{PC}} r_{i,t}^{\text{RegM}} \bar{k}_i^{\text{Per}}, \quad (14)$$

式中: R_i^{CC} 和 R_i^{PC} 分别为调频资源 i 的调频容量收益和调频里程收益; P^{CC} 和 P^{PC} 分别为系统调频容量和调频里程出清价格; $r_{i,t}^{\text{RegC}}$ 为调频资源 i 中标的调频容量; $r_{i,t}^{\text{RegM}}$ 为调频资源 i 实际的调频里程。

3 运营实践及效益分析

浙江调频市场通过引入电能和调频联合优化的市场机制,实现了成本和效益的最优化。5 次结算试运行的实践表明,浙江引入调频辅助服务市场后,有利于降低调频服务供应成本,同时提升了系统调频性能,也为储能等灵活调节资源大规模发展提供收益来源。主要包括以下几个方面。

3.1 电能和调频联合优化实现市场最优

根据式(7)可知,调频市场出清价格影响因素包括调频容量价格、调频里程价格和机会成本,其

中机会成本为调频资源提供调频服务而损失的电能收益,如式(1)所示。机会成本主要取决于电能市场的出清价格和市场主体的电能量市场报价之间的差值。以浙江调频市场某月运行数据为例,调频市场费用影响因素1如图3所示。调频费用变化趋势与机会成本基本吻合,两者相关系数0.9662;而机会成本变化趋势与电能市场出清价格变化趋势大体相近,两者相关系数0.9012。因此,电能市场出清价格和市场主体的电能量市场报价之间的差值很大程度上影响调频费用。该月日均调频费用301.09万元,日均电能价格387.61元/(MW·h),其中5,8,11日因供需关系偏紧造成电能量价格高企(较均价分别高出30.65%,55.80%和62.35%),而市场主体在电能量市场中报价变化不大,两者差值增大导致调频费用较均值高出148.60%,149.16%和124.60%。通过机会成本实现电能量价格和调频价格的联动,在电能量市场价格较高的时段,机组因提供调频服务而损失的电能量市场收益更多,因此在调频市场中得到的收益应更高,如此才能激励机组积极参与电网调频。此外,在计算调频资源*i*的排序价格时,已将调频资源*i*的调频成本和机会成本计算在内,在边际出清时将排序价格由低到高进行排序,自动筛选出了调频成本和机会成本综合最低的调频资源优先中标,实现了成本最小化。

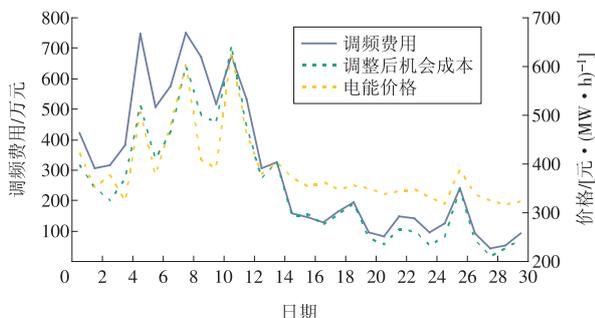


图3 调频市场费用影响因素1

Fig. 3 Factors A affecting the cost of regulation market

因此,浙江市场设计调频与电能量联合优化、耦合出清机制,通过机会成本耦合达到电能和调频的最优组合,实现成本和效益的最优化,同时减少两者间的影响关系,降低市场主体报价难度,可以充分反应调频资源的机会成本和燃料成本,激励调频资源主动提高调频性能,提升“双碳”目标下新型电力系统的调节能力。

3.2 市场化资源配置降低调频成本

由于市场竞争程度不断增加,调频费用不断降低。与首次结算试运行相比,第5次试运行日均调频费用由713.99万元下降至162.24万元,降幅高

达77.28%,反映出浙江调频市场机制设计能够实现调频资源优化配置,降本增效的市场建设目标。具体分析如下。

浙江调频市场规定,调频容量申报价格上、下限分别设置为10元/(MW·h)和0元/(MW·h),调频里程上、下限分别设置为15元/MW和0元/MW。若市场主体申报的调频容量价格和调频里程价格均为零,则默认其机会成本为零,该市场主体作为价格接受者参与调频市场。因此,调频市场申报价格尤其是报价为零机组的占比很大程度上决定了调频出清价格及调频费用的高低。

以浙江调频市场某月运行数据为例,调频市场费用影响因素2如图4所示。调频费用变化趋势与机会成本基本吻合,与报价为零机组的占比成反比,调频费用与零价机组占比之间的相关系数为-0.8188。市场运行之初,调频市场报价较高,调频出清价格及调频费用偏高;市场运行一段时间后,因电能量市场竞争较为激烈,部分机组通过以价换量的方式争取更多的调频中标容量,调频市场出清价格趋于稳定。这体现出市场主体报价策略从高收益到争取中标,并最终稳定于市场供需形势的过程。

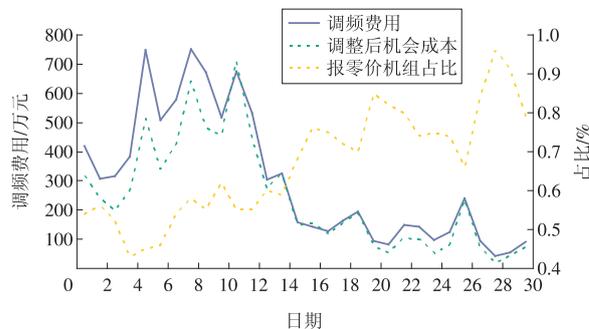


图4 调频市场费用影响因素2

Fig. 4 Factors B affecting the cost of regulation market

3.3 市场化资源配置提升调节性能

随着浙江电力现货市场结算试运行逐步深入,调频市场中标机组平均调频性能呈现上升趋势,如图5所示。至第5次结算试运行(2021年12月),燃煤与燃气机组综合调频性能指标分别较首次试运行(2019年9月)提升27.33%和226.84%,机组平均调频性能提升101.80%。可以看出燃气机组综合调频性能提升了2倍以上。燃气机组作为灵活调节资源之一,在调频市场中占主要的比重,其调节性能提升能够有效提高系统的调频能力,包括更快的调节速率、更短的响应时间和更小的调节偏差。

从结果来看,浙江调频市场能够充分调动机组积极性,激励发电企业主动进行技术改造,大幅提

升调频性能,促进新能源消纳,为浙江建设新型电力系统省级示范区打下基础。

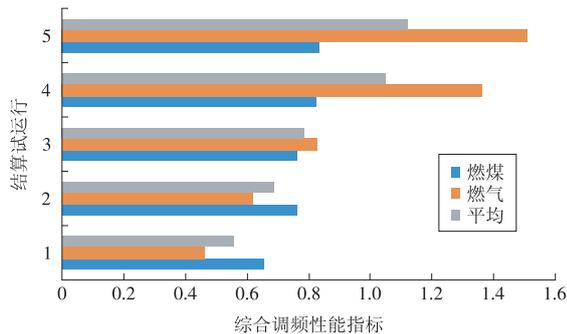


图 5 综合调频性能指标变化趋势

Fig. 5 Variation trend of the comprehensive regulation performance index

3.4 市场资源配置增加收益来源

目前浙江调频市场参与主体为燃煤和燃气 2 类,燃气机组燃料成本相对较高,在电能市场竞争中不占优势,前 3 次结算试运行中标电量较低,第 4 次结算试运行恰逢检修高峰,更多燃气机组开机并进入市场,发电占比增长和调频性能提升使得燃气机组在调频市场中收益大幅增加,日均调频收益较历次结算试运行提升 115% 以上。因调频性能较优,燃气机组度电调频收益较燃煤机组高出 2 倍以上。

与传统两个细则相比,引入市场竞争机制后,调频性能好的资源能够获得更高的调频收益,这为燃气机组等燃料成本高、调节性能好的资源提供新的盈利模式,也为储能等灵活性调节资源大规模发展提供经济基础,有利于推动源网荷储友好互动,提升电网调节能力,促进新能源消纳^[21-23]。

4 总结与展望

浙江调频辅助服务市场通过集中竞价、边际出清的交易机制,实现了调频辅助服务从“人工调度、合理补偿”的计划模式转变为“价格引导、充分竞争”的市场化交易模式。浙江现货市场 5 次结算试运行以来,通过电能量-调频服务联合优化、耦合出清的方式,在保障系统平衡能力、优化调频资源配置、提高机组调节性能、吸引市场主体参与等方面起到了积极的促进作用,也为辅助服务市场机制进一步优化完善积累了大量数据以及宝贵经验,社会效益和经济效益显著。随着电网调节需求的不断提升和现货市场的推进,辅助服务市场机制需不断发展完善,结合浙江调频市场的运行实践,提出以下完善建议。

(1) 丰富调频辅助服务参与主体。除常规发电

主体外,推动储能等各类灵活调节资源参与市场。根据储能响应速度快、调节容量小等物理特性设计合理的调用机制;从协调常规调频机组与储能等快速调频资源收益角度设计合理的价格机制,完善适应于灵活性调节资源参与的调频市场交易规则,为灵活性调节资源参与辅助服务市场提供机制和技术保障。

(2) 建立多元化的辅助服务市场体系。基于具体电源结构以及系统不同的调节需求,设计不同的辅助服务市场交易品种。完善调频、备用等辅助服务市场,探索转动惯量、快速爬坡等新型辅助服务品种。通过市场化机制深入挖掘电网调节能力,提升系统调节能力,促进新能源消纳。

(3) 建立用户侧主体参与辅助服务市场机制。以市场化手段,推动辅助服务市场机制由电源侧向用户侧延伸。同时按照“谁受益、谁承担”的原则,公平确定各类成本的分摊主体,推动辅助服务成本向用户侧疏导。

参考文献:

- [1] 代江,姜有泉,田年杰,等.“双碳”目标下贵州电力调峰辅助服务市场设计与实践[J].华电技术,2021,43(9):85-90.
DAI Jiang, JIANG Youquan, TIAN Nianjie, et al. Design and practice of peak regulation ancillary service market in Guizhou for achieving carbon neutrality and carbon peaking [J]. Huadian Technology, 2021, 43(9): 85-90.
- [2] 浙江省发展和改革委员会,浙江省能源局.关于印发《浙江省可再生能源发展“十四五”规划》的通知[EB/OL].(2021-06-23) [2021-11-02]. http://www.zj.gov.cn/art/2021/6/23/art_1229203592_2305636.html.
- [3] 中华人民共和国国务院.关于印发《2030年前碳达峰行动方案》的通知[EB/OL].(2021-10-24) [2021-11-02]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm.
- [4] FERC order No. 755: Frequency regulation compensation in the organized wholesale power markets[EB/OL].(2011-10-06) [2021-11-02]. <http://www.ferc.gov/whats-new/comm-meet/2011/102011/E-28.pdf>.
- [5] PJM. PJM manual 11: Energy & ancillary services market operations [EB/OL].(2017-06-15) [2021-11-02]. <http://www.pjm.com/~media/documents/manuals/m11.ashx>.
- [6] PJM.Regulation details, details, pricing & clearing[EB/OL].(2017-07-01) [2021-11-02]. <http://www.pjm.com/training/~media/F2C185A143154118911D2FD9998D62BE.ashx>.
- [7] California ISO. Pay for performance regulation draft final

- proposal [EB/OL]. (2017-05-20) [2021-11-02]. http://www.caiso.com/Documents/DraftFinalProposal_PayForPerformanceRegulationYearOneDesignChangs.pdf.
- [8] 国家能源局山西监管办. 山西电力调频辅助服务市场运营细则[R]. 太原: 国家能源局山西监管办, 2017.
- [9] 国家能源局南方监管局. 关于印发《广东调频辅助服务市场交易规则(试行)》的通知[EB/OL]. (2018-08-22) [2021-11-02]. http://120.31.132.37:8085/SCSERC_OUTER/temp/examples/upfileattach/71620229_wz_towaiwang.pdf.
- [10] 李舒佳, 谢敏, 李建钊, 等. 电能量-调频市场联合优化模式研究[J]. 南方能源建设, 2020, 7(3): 55-61.
LI Shujia, XIE Min, LI Jianzhao, et al. Study on the joint optimization mode of electric energy and regulation market [J]. Southern Energy Construction, 2020, 7(3): 55-61.
- [11] 唐琦雯, 肖艳炜, 项中明. 调频市场定价及出清机理的研究及启示[C]//中国电机工程学会电力市场专委会2019年年会论文集, 2019.
- [12] 刘广一, 陈乃仕, 蒲天骄, 等. 电能调频和运行备用同时优化的数学模型与结算价格分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 28(13): 71-78.
LIU Guangyi, CHEN Naishi, PU Tianjiao, et al. Mathematical model and clearing price analysis of co-optimization of energy regulation and operating reserves [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13): 71-78.
- [13] STASCHUS K. Review of German approaches to ancillary services costing and pricing [C]//Proceedings of IEE Colloquium on Pricing of Ancillary Services. UK: London, 1996.
- [14] HIRST E, KIRBY B. Costs for electric - power ancillary services[J]. The Electricity Journal, 1996, 9(10): 26-30.
- [15] 王娟娟, 李卫东, 赵闻蕾, 等. 电力市场中AGC辅助服务的成本研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 56-60.
WANG Juanjuan, LI Weidong, ZHAO Wenlei, et al. Overview of AGC ancillary service costs in electric market [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 56-60.
- [16] 胡倩, 孙志达, 江珂滕, 等. 基于短期负荷打捆预测的售电公司偏差考核控制方法[J]. 华电技术, 2021, 43(4): 47-55.
HU Qian, SUN Zhida, JIANG Keteng, et al. Deviation assessment and control method for electricity sales companies based on short-term load bundling forecast [J]. Huadian Technology, 2021, 43(4): 47-55.
- [17] 陶春华, 马光文. 电力市场环境下AGC成本研究[J]. 华东电力, 2006, 34(4): 5-6.
TAO Chunhua, MA Guangwen. AGC cost in power market [J]. East China Electric Power, 2006, 34(4): 5-6.
- [18] 钟连宏, 陆培均, 仇志成, 等. 直接地极电流对中性点直接接地变压器影响[J]. 高电压技术, 2003, 29(8): 12-13, 28.
ZHONG Lianhong, LU Peijun, QIU Zhicheng, et al. The influence of current of DC earthing electrode on directly grounded transformer [J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(8): 12-13, 28.
- [19] 马为民. 换流变压器中直流偏磁电流的计算[J]. 高电压技术, 2004, 30(11): 48-49.
MA Weimin. DC biasing current in converter transformer [J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(11): 48-49.
- [20] 陈中飞, 荆朝霞, 陈达鹏, 等. 美国调频辅助服务市场的定价机制分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(12): 1-10.
CHEN Zhongfei, JING Zhaoxia, CHEN Dapeng, et al. Analysis on pricing mechanism in frequency regulation ancillary service market of United States [J]. Automation of Electric Power System, 2018, 42(12): 1-10.
- [21] 陈大宇, 张粒子, 王澍, 等. 储能在美国调频市场中的发展及启示[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 9-13.
CHEN Dayu, ZHANG Lizi, WANG Shu, et al. Development of energy storage in frequency regulation market of united states and its enlightenment [J]. Automation of Electric Power System, 2013, 37(1): 9-13.
- [22] 童家麟, 洪庆, 吕洪坤, 等. 电源侧储能技术发展现状及应用前景综述[J]. 华电技术, 2021, 43(7): 17-23.
TONG Jialin, HONG Qing, LYU Hongkun, et al. Development status and application prospect of power side energy storage technology [J]. Huadian Technology, 2021, 43(7): 17-23.
- [23] 张兴科, 魏朝阳, 王康平, 等. 面向高比例光伏并网的火电爬坡压力缓解策略[J]. 综合智慧能源, 2022, 11(1): 1-8.
ZHANG Xingke, WEI Chaoyang, WANG Kangping, et al. Strategies for relieving ramp pressure of thermal power units with high-proportion photovoltaic power connecting to the grid [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 11(1): 1-8.

(本文责编: 张帆)

作者简介:

唐琦雯(1989),女,高级工程师,工学硕士,从事电力调度及电力市场设计、分析与运营方面的研究, tangqiwen8888@126.com;

沈琪(1983),男,高级工程师,从事天然气电站运营、电力市场交易方面的研究, 56735487@qq.com;

祝俊(1981),男,高级工程师,工学硕士,从事水电站运营、水电参与电力市场交易方面的研究, 9154379@qq.com。