

独立储能参与调频辅助服务市场机制设计

林阿竹¹,柯清辉²,江岳文^{1,3,4}

(1. 福州大学 电气工程与自动化学院,福建 福州 350108;

2. 国网福建省电力物资有限公司,福建 福州 350013;

3. 智能配电网装备福建省高校工程研究中心,福建 福州 350108;

4. 福建省电器智能化工程技术研究中心,福建 福州 350108)

摘要:在能源绿色低碳转型的大背景下,电力系统的调频缺口日益增大。储能参与调频辅助服务市场中具有较大的性能优势,合理的市场机制可以正确引导储能有序提供辅助服务并获得收益。为此,设置了调节精度、响应时间、调节速度调频性能指标,并引入效率因子来体现快速调频资源的优势,鼓励市场积极引入储能类优质的调频资源,以优化配置系统中的调频资源。考虑储能的实时荷电状态,设置容量均衡因子来调整储能的报价策略,并对比分析了有、无储能场景对系统调频的影响,客观剖析了独立储能参与调频辅助服务市场存在的优势以及需要完善的问题。通过实际算例验证了所提机制的有效性。

关键词:独立储能;调频辅助服务;性能指标;效率因子;容量均衡因子;市场机制

中图分类号:TM 73;F 123.9

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202204040

0 引言

可再生能源的大规模并网增加了电网频率调节的工作量和工作难度,特别是在新能源大量接入的地区,传统的调频手段已无法较好地满足系统的调频需求^[1-2]。合理进行频率调整是保证供电质量的一项重要措施,可实现无差调节的二次调频更是对调频主体的调节效果提出了较高的要求,而传统的调频资源各自具有一定的局限性^[3]。储能系统具有双向调节的能力,可快速准确地响应调度指令,能较好地发挥效用在调频辅助服务市场中,提高电力系统运行的灵活性并促进可再生能源消纳,在能源革命、低碳化转型的背景下具有十分可观的应用前景^[4]。

近年来,关于储能参与调频的研究主要集中于控制策略和经济性分析两大方面:文献[5]详细介绍了储能参与调频的动作原理和控制流程;文献[6]综合评价了储能参与调频辅助服务的运行效益,为其投资应用提供决策参考;文献[7]采用新型储能的循环寿命测算模型评价储能配置和运营策略的经济性。上述研究提出了储能参与调频的控制策略,分析了储能投资的经济可行性,但并未涉及市场机制的设计和整合。

储能电池的成本随着技术的革新不断降低,这有利于电化学储能的广泛部署,且相较于参与能量市场套利和提供其他辅助服务,储能参与调频辅助服务市场所获的收益较可观^[8]。储能调频电站的收益取决于市场对调频辅助服务的结算机制,所以合理设计储能参与调频辅助服务市场的机制具有重要

的意义。文献[9]考虑新能源作为调频资源的出力不确定性,以准确度作为调频质量的衡量指标;文献[10]分析了调频辅助服务市场逐步饱和后的发展模式和调整机制;文献[11]调研了近年来国外储能调频项目的运行情况,分析了不同市场机制的适用性,为我国储能调频的实现提供经验启示。在已有的市场机制中,我国华北地区按自动发电控制 AGC (Automatic Generation Control) 的可用时间和服务贡献分别进行调频补偿;广东、福建、江苏等省份的调频辅助服务市场采用容量加里程的两部制补偿方式;山东省的电力辅助服务市场明确了在发电机组的相关定义中新增储能设施,根据日总调频里程和机组当天的性能指标计算日调频补偿费用^[12-16]。与现有的市场机制相比,本文进行了如下改进:将文献[15]中对调频精度的积分运算简化为差分;相较于文献[14],多考虑了资源响应调频信号的延迟性;文献[13-15]中将标准调节速度设置为与资源爬坡速率类似的固定值,考虑到不同时段资源的运行工况可能有较大差异,本文根据资源近期的实际运行表现来进行取值设定。

相较于其他传统的调频手段,储能具有突出的优势:文献[17]表明在需要频繁进行频率调节时,储能响应区域控制误差的高效性大约为常规机组的6~8倍;文献[18]对比了储能和火电机组的 AGC 实时测试曲线,展现了储能快速精准跟踪指令的能力。在不考虑调频效果对结算影响的情况下,资源无需提升调频性能就可获得较高的收益,这样对调频性能较好的辅助服务供应商是不公平的,且无法促使资源提升其调频性能为系统提供更加优质的服务,不利于系统的安全经济运行,故有必要引入能衡量

不同调频资源调频性能的评价标准。原有市场机制中的性能评价指标体系对储能类的非传统调频资源参与调频辅助服务市场的性能评估具有局限性,为此本文在现有评价指标体系的基础上进行改进,提出了适用于储能系统的评价方法。

1 储能参与调频辅助服务市场的机制设计

1.1 报价排序

1.1.1 综合调频性能指标

为了体现储能类快速调节资源的优势,优化调频资源的配置,本文类比文献[15]中调频辅助服务市场调频性能指标的计算方法,以调节精度、响应时间、调节速度为指标对调频性能进行综合评估。原则上,各性能指标的取值范围为0~1,且相较于其他资源,储能资源的性能指标取值更接近1。

1) 调节精度。

本文以15 min为一个结算周期,令一个周期内调频资源响应指令的次数为 n ,调频精度 K^{acc} 用调频实际出力与调频指令信号之间的差值函数进行衡量,如式(1)所示。

$$K^{\text{acc}} = 1 - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{\max\{|R_j - S_j|\}}{V} \quad (1)$$

式中: R_j 为供应商在周期内第 j 次响应指令时的出力; S_j 为第 j 个调频指令信号; $\max\{|R_j - S_j|\}$ 为第 j 次响应指令时的最大偏差; V 为该周期内供应商自身的调频信号绝对值的平均值。当 $K^{\text{acc}}=1$ 时,表示供应商的调频里程与调频指令信号一致;当 $K^{\text{acc}}=0$ 时,表示供应商无响应。为了避免部分资源的调节精度差甚至出现反向调节,而使得该指标的取值很小甚至为负值的情况,本文限制 K^{acc} 的最小取值为0.1。

2) 响应时间。

响应时间是指系统发出调频指令后,供应商在原有出力的基础上可靠跨出与调节方向一致的调节死区所用的时间。该指标可用处于调节死区的时间长短来衡量。

在实际的调节过程中,根据资源类型对调节死区的范围进行区分,不同类型资源的调差系数和频率死区的取值不同,储能位于死区内的时间极短,可忽略不计。

考虑响应每个调频指令的全过程,统计接收第 j 个指令后调节过程中的死区时间 t_j^0 和从接收到完成该指令的总时长 t_j^1 ,根据式(2)可求得在结算周期内第 j 次响应指令时的响应时间指标 K_j^{ans} 。因为指令下发具有不固定性,对每次指令的响应过程进行单独计算,若在一个结算周期内多次响应调频指令信号,则取多次响应指令时响应时间指标 K_j^{ans} 的平均值作为该结算周期内的响应时间指标最终结果 K^{ans} ,

如式(3)所示。

$$K_j^{\text{ans}} = 1 - t_j^0 / t_j^1 \quad (2)$$

$$K^{\text{ans}} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n K_j^{\text{ans}} \quad n \geq 1 \quad (3)$$

位于调节死区的时长越短,则响应时间指标越好。储能没有调节死区,其响应时间指标取值为1。

3) 调节速度。

调节速度是指资源响应调频指令信号的快慢,用各主体的实际调节速度与其应达到的标准速度之比进行衡量。

根据实际的出力调节曲线计算第 j 次响应指令时的调节速度 v_j^{real} ,如式(4)所示。

$$v_j^{\text{real}} = |P_j^{\text{end}} - P_j^{\text{start}}| / (t_j^{\text{end}} - t_j^{\text{start}}) \quad (4)$$

式中: P_j^{start} 、 P_j^{end} 分别为资源第 j 次响应指令动作开始、结束时的实际出力; t_j^{start} 、 t_j^{end} 分别为第 j 次响应指令的开始、结束时间。

为了使市场的标准调节速度更具有代表性,本文取调频资源在运行日前上半个月的调频数据进行计算,则资源在一个结算周期内的调节速度性能指标 $K^{\text{spe'}}$ 为:

$$\left\{ \begin{aligned} K^{\text{spe'}} &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n v_j^{\text{real}} / v^{\text{base}} \\ v^{\text{base}} &= \sum_{i \in N} \sigma_i v_i^{\text{ave}}, \quad v_i^{\text{ave}} = \sum_{j=1}^{Q_i} v_{i,j}^{\text{real}} / Q_i \end{aligned} \right. \quad (5)$$

式中: v_i^{ave} 为资源 i 在半个月参与调频的平均速度; v^{base} 为整个市场通用的标准调节速度; $v_{i,j}^{\text{real}}$ 为资源 i 在第 j 次响应调频指令信号时的实际调节速度; σ_i 为资源 i 在系统的装机容量占比; Q_i 为半个月资源 i 响应指令信号的总次数; N 为运行当天参与调频的资源集合。以 $\max\{v_i^{\text{ave}} / v^{\text{base}} | i \in N\}$ 为基准进行归一化处理,并限制调节速度指标的最小值为0.1,可得到最终的调频速度性能指标 K^{spe} 。

综合调频性能指标 A^{his} 设定为上述3个指标的加权平均值,见式(6),可根据历史数据和运行经验确定3个指标权重 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 的取值。对于储能而言,其调节精度尤为重要,故可取 $\lambda_1=0.50$ 、 $\lambda_2=\lambda_3=0.25$ 。

$$A^{\text{his}} = \lambda_1 K^{\text{acc}} + \lambda_2 K^{\text{ans}} + \lambda_3 K^{\text{spe}} \quad (6)$$

如果资源在结算周期内没有接收到系统下发的调频指令信号,则不考虑其在该时段的综合调频性能指标。通过分时段对前半个月的调节精度指标 K^{acc} 、响应时间指标 K^{ans} 、调节速度指标 K^{spe} 进行计算,得到各时段的历史综合调频性能指标 A^{his} ,用于日前市场中资源的报价排序。

1.1.2 效率因子

定义效率因子为在满足同样的调频需求时所需的传统调频资源容量与快速调频资源容量的比值,利用其对快速调频资源的价值进行衡量。快速调频

资源能以更少的容量来达到同样的调频目的,具有更好的调频效率。为了便于后续叙述和分析,本文设定火电机组为传统调频资源,其余设备均视为快速调频资源。

基于前述综合调频性能指标的结果,效率因子的计算式为:

$$\begin{cases} f_{i,t} = A_{i,t}^{\text{real}} / \bar{A}_t^{\text{real}} \\ \bar{A}_t^{\text{real}} = A_{w,t}^{\text{real}} \gamma_{w,t} / \sum_{w'=1}^{n_t^f} C_{w',t} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $f_{i,t}$ 为时段 t 资源 i 的效率因子; $A_{i,t}^{\text{real}}$ 为时段 t 资源 i 的实时综合调频性能指标; $\bar{A}_t^{\text{real}}$ 为时段 t 内所有火电机组综合调频性能指标的加权平均值; $C_{w,t}$ 为时段 t 火电机组 w 的可用 AGC 容量; n_t^f 为时段 t 参与调频的火电机组数量; $\gamma_{w,t}$ 为权重,表示时段 t 火电机组 w 的可用 AGC 容量占时段 t 内所有火电机组的可用 AGC 容量的比重。

时段 t 资源 i 的效用容量 $C_{i,t}^{\text{eff}}$ 可表示为

$$C_{i,t}^{\text{eff}} = C_{i,t} f_{i,t} \quad (8)$$

式中: $C_{i,t}$ 为时段 t 资源 i 的 AGC 中标容量,即物理容量。

效用容量与具体的物理容量在概念上有所差异,主要体现在对调频性能的价值衡量,结算时仍采用调频资源的实际 AGC 容量。引入效用容量的概念可以对调频资源的性能进行更直观的表达,例如:当储能的效率因子的取值为 3 时,可视作 1 MW 的储能提供的调频辅助服务需要 3 MW 的火电机组容量才能在调节精度、响应时间、调节速度等方面达到一样的调频效果。

1.1.3 容量均衡因子

在调度周期前 5 min,市场根据储能实时荷电状态 SOC(State Of Charge)的变化情况考虑增加动态容量均衡因子,使在调度周期前 15 min 市场内储能中标但可用容量不足时临时对储能的价格进行修正,令其退出调频辅助服务市场,且不影响其他资源原有的价格排序。

容量均衡因子 β 的取值与储能 SOC 密切相关,当 SOC 在充电过程中接近上限时, β 的取值会相应减小,当 SOC 在放电过程中接近下限时, β 的取值相应增大,力求维持在较为稳定的中值。充放电深度对电池的寿命周期影响较大,考虑到电池储能系统的高成本特质和储能电池的损耗,本文设置将电池的 SOC 控制在较优的 0.2~0.8 范围内,防止电池过充过放,从而降低经济损耗^[19]。

容量均衡因子 β 的表达式为:

$$\beta = \begin{cases} S_{\text{soc}} - 0.1 & S_{\text{soc}} > 0.8 \\ 0.5 & 0.2 \leq S_{\text{soc}} \leq 0.8 \\ S_{\text{soc}} + 0.1 & S_{\text{soc}} < 0.2 \end{cases} \quad (9)$$

式中: S_{soc} 为储能的 SOC。综合考虑实时性和市场的可操作性,设置调频周期前 5 min 市场根据 SOC 确定 β 的大小,然后通过调整储能的价格来改变资源的调用顺序。则储能考虑容量均衡因子再次调整后的资源价格 $p^{\text{m,bal}}$ 为:

$$p^{\text{m,bal}} = p^{\text{m,adj}} (1 + F(\beta)) \quad (10)$$

$$F(\beta) = 10 |\beta - 0.5| \quad (11)$$

式中: $p^{\text{m,adj}}$ 为仅考虑综合调频性能指标 A^{his} 时储能的里程报价; $F(\beta)$ 为价格调整系数,是关于 β 的函数。

综合考虑式(9)和式(11),当 SOC 越限时,使储能的价格大幅提升,从而达到避免被继续调用的目的,且 SOC 越限越多,价格提升的幅度越大。

1.1.4 报价综合排序

在日前市场中,容量报价与里程报价均需要考虑到资源在以往调频过程中性能的好坏,以此为依据对原始报价进行调整,以调整之后的容量报价和里程报价之和作为资源调用的排序依据。则综合排序价格 p^{rank} (单位为元 / MW) 可表示为:

$$\begin{cases} p^{\text{rank}} = p^{\text{c,adj}} + p^{\text{m,adj}} \\ p^{\text{c,adj}} = p^{\text{c,0}} / A^{\text{his}}, p^{\text{m,adj}} = p^{\text{m,0}} / A^{\text{his}} \end{cases} \quad (12)$$

考虑过去半个月内的历史综合调频性能指标 A^{his} ,先根据原始的容量报价 $p^{\text{c,0}}$ 和里程报价 $p^{\text{m,0}}$ 分别计算调整后的容量报价 $p^{\text{c,adj}}$ 和里程报价 $p^{\text{m,adj}}$,然后将容量报价与里程报价相加,得到综合排序价格 p^{rank} 。

1.2 出清流程

在有储能等新能源参与的调频辅助服务市场中,采用日前报价、调度周期前 15 min 排序、调度周期前 5 min 再排序、实时调用的出清方式,使市场更能反映调频资源的可用状态。

1) 日前市场。

电力调度机构根据对次日负荷需求的预测结果,初步计算第二天的调频容量需求。系统的日调频容量需求可以根据以下 3 种方式确定:①通过取此前一周各时段的容量需求的历史数据来近似估算;②对次日进行负荷预测,大致取峰荷的 1% 作为运行日的平均调频容量需求;③基于负荷超短期预测数据,取每个时段最高负荷与最低负荷的差值作为该时段负荷变化导致的调频需求量^[20]。准许各调频资源提供申报容量、容量报价、里程报价等数据,并结合历史综合调频性能指标计算调整后的报价。

2) 调度周期前 15 min 市场。

基于当前我国普遍的市场模式设置调度周期前 15 min 市场,得到调整后的容量报价和里程报价之和,以此作为初步排序的依据。调度周期前 15 min 市场能更准确地预测实时的供需情况,若某些资源在该时段发生故障,则将其退出调度周期,及时修正调频资源的排序。

3) 调度周期前 5 min 市场。

设置调度周期前 5 min 市场的目的在于考虑储能 SOC 的动态变化和限制,更好地衡量储能调频的能力。对于储能而言,需要在该市场内考虑其 SOC,并据此得到容量均衡因子,对自身的报价进行再次调整,从而实现调频资源的再次排序。

4) 实时市场。

根据电网的实际情况对调频容量需求进行修正,按顺序依次对各供应商进行调用,并进行最后的容量和里程定价。在该市场中需要考虑效率因子,该指标会改变调频辅助服务市场的调用主体和最终的调频总成本。

1.3 结算

实际的结算过程为各结算周期的收益累积,应考虑各个调频资源的实际运行效果。在计算最终收益时需考虑各调频资源的实际性能指标 A^{real} ,其计算公式与 A^{his} 一致,但取值为当前时段计算所得系列调频性能指标, A^{his} 用于报价调整, A^{real} 用于结算。本文参考福建省调频辅助服务市场采用的日清月结方式,单日的容量收益 R^{cap} 和里程收益 R^{mil} 分别为:

$$R^{\text{cap}} = \sum_{t=1}^{96} \sum_{i \in N} C_{i,t} A_{i,t}^{\text{real}} p_t^c \eta_i \quad (13)$$

$$R^{\text{mil}} = \sum_{t=1}^{96} \sum_{i \in N} M_{i,t} A_{i,t}^{\text{real}} p_t^m \quad (14)$$

式中: $M_{i,t}$ 为时段 t 资源 i 中标的调频里程; p_t^c 、 p_t^m 分别为时段 t 市场统一出清的容量价格、里程价格; η_i 为资源 i 的容量有效率,以考虑上一个月该资源的有效运行时间。

资源并非在所有中标时段都能可靠提供足量的调频服务,有时甚至会出现损坏而不可用的情况。作为一个长期性指标,容量有效率 η 反映了资源 AGC 功能良好的可用状态,计算式为:

$$\eta = T_{\text{AGC},a} / T_{\text{AGC},\text{total}} \quad (15)$$

式中: $T_{\text{AGC},a}$ 为可投入 AGC 时间; $T_{\text{AGC},\text{total}}$ 为 AGC 月投标总时长。

2 数学建模

根据上述机制,建立以系统支付的调频费用最小为优化目标模型,其本质是使调节性能好、报价低的资源优先中标,在满足市场调频需求的前提下尽可能减小整个市场的调频成本。

2.1 目标函数

目标函数可表示为:

$$\min \sum_{t=1}^{96} \sum_{i \in N} \mu_{i,t} A_{i,t}^{\text{real}} (C_{i,t} p_t^c \eta_i + M_{i,t} p_t^m) \quad (16)$$

式中: $\mu_{i,t}$ 为时段 t 资源 i 的运行状态。

投标时 $A_{i,t}^{\text{real}}$ 和 $M_{i,t}$ 未知,可根据过去一周资源 i 的历史数据对 $A_{i,t}^{\text{real}}$ 进行估算,而 $M_{i,t}$ 需结合过去一周内资源 i 的里程调用率 α^{his} 和时段 t 资源 i 的 AGC 中标容量 $C_{i,t}$ 进行取值。里程调用率 α^{his} 可通过计算该

资源在过去一周内所有时段的调频里程与调频容量比值,再取其平均值获得。

最终市场的出清价格与各资源的运行状态、可用调频容量、性能参数有关,性能参数可根据历史运行数据计算得到,故令决策变量为时段 t 内参与调频的资源 i 的运行状态 $\mu_{i,t}$ 及其 AGC 中标容量 $C_{i,t}$ 。

2.2 约束条件

约束条件主要包括系统调频容量需求和里程需求约束,机组容量、功率、爬坡约束,储能 SOC 约束以及资源调频状态约束,即:

$$\sum_{i \in N} f_{i,t} C_{i,t} \geq C_t^{\text{req}} \quad (17)$$

$$\sum_{i \in N} f_{i,t} M_{i,t} \geq M_t^{\text{req}} \quad (18)$$

$$C_{i,t} \leq C_{i,t}^s \quad (19)$$

$$P_i^{\min} \leq P_{i,t}^{\text{en}} + C_{i,t} \leq P_i^{\max} \quad (20)$$

$$\mu_{i,j}^{\text{up}} + \mu_{i,j}^{\text{dn}} \leq 1 \quad (21)$$

$$k_1 \leq S_{\text{soc},t} \leq k_2 \quad (22)$$

$$-\Delta P_i \leq P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq \Delta P_i \quad (23)$$

式(17)和式(18)分别为系统调频容量需求、里程需求约束, C_t^{req} 、 M_t^{req} 分别为时段 t 需满足的系统调频容量需求、里程需求;式(19)表示时段 t 资源 i 的 AGC 中标容量 $C_{i,t}$ 不得超过其申报的 AGC 可用调频容量 $C_{i,t}^s$;式(20)表示时段 t 资源 i 在能量市场的出力 $P_{i,t}^{\text{en}}$ 与其在调频辅助服务市场的中标容量 $C_{i,t}$ 之和必须在其自身出力下限 $P_i^{\min}$ 与上限 $P_i^{\max}$ 范围之内;式(21)表示在任意一次响应过程中,某一特定资源只能处于上调频或下调频中的一种状态, $\mu_{i,j}^{\text{up}}$ 、 $\mu_{i,j}^{\text{dn}}$ 分别为资源 i 在第 j 次响应调频指令信号时的上调频、下调频标志位,为 0-1 变量,取值为 1 时表示运行于相应的调频状态,为 0 时表示不运行于相应的调频状态;式(22)为储能的 SOC 约束, $S_{\text{soc},t}$ 为时段 t 储能的 SOC, k_1 、 k_2 分别为 SOC 的下限、上限;式(23)为调频资源的爬坡约束, $P_{i,t}$ 、 $P_{i,t-1}$ 分别为时段 t 、 $t-1$ 资源 i 在能量市场和调频辅助服务市场的出力总和, ΔP_i 为资源 i 在一个时段内允许升降的出力,其值可通过查询不同类型资源的爬坡速率确定。

3 算例分析

3.1 参数设置

3.1.1 调频资源参数

取某省一个已经发生的完整运行日进行资源调频性能指标计算和价格排序,模拟完成出清过程,得到市场一天所需支付的调频费用,分析上述设计的调频辅助服务市场机制的合理性和储能参与调频辅助服务市场的优势。

设置 14 个资源个体参与日调频辅助服务市场,在实际运行日结合资源的实际运行情况进行各时段的模拟出清。同时做出如下假设:

1)抽水蓄能资源参与调频的时间受到限制,令抽水蓄能1的运行时段为16:00—22:30,抽水蓄能2的运行时段为09:00—12:30;

2)储能仅在00:00—09:45时段参与调频,在其余时段无电化学储能参与;

3)火电机组的调频容量受开停机时间和当天发电计划约束,水电机组的调频容量受到水情和水库调度的影响。

完整的AGC可调节容量设置见附录A表A1。

3.1.2 调频容量需求

调频容量是指一段时间内发电资源需要预留的资源总量,其收益体现了各供应商提供调频服务的机会,具体设置见附录A图A1。

3.1.3 历史调频性能指标

采用日前数据计算各资源的历史调频性能指标。其中计算响应时间性能指标时,各调频资源的死区时间参数取值见附录A表A2。计算得到资源的死区范围后,可结合其调节速度计算响应时间。

以15 min为间隔,将一天分为96个时段进行出清,并取调频资源较多的时段39为典型时段进行分析。基于前述设置,储能具有最高的综合调频性能指标,其取值接近于1;抽水蓄能的综合调频性能指标取值次之,约为0.7;水电机组的综合调频性能指标取值在0.55~0.70范围内;火电机组的综合调频性能指标取值在0.1~0.6范围内,具体取值取决于机组在时段内的调频表现。资源调频性能指标结果见附录A表A3。可见,储能电站的各项调频指标都远高于传统调频资源,而目前调频最常用的火电机组在性能方面的竞争力较弱。

3.1.4 效率因子

对效率因子进行取值时,以火电机组综合调频性能指标的加权平均值作为基准,其他类型的调频资源的性能优于火电机组,按基准综合调频性能指标进行折算后,其效率因子取值均大于1。

此处设置的效率因子不会影响资源报价,而是通过效用容量进一步衡量资源调频容量的差异,达到减少参与调频的资源容量的目的,相当于使性能好的资源能承担更多的调频任务,降低市场的边际价格和系统的总调频成本。

3.1.5 容量均衡因子

假设储能电站的日初始SOC为0.5,一天内根据实际的充放电情况得到储能SOC,以此为依据对容量均衡因子加以考虑。

储能电站在某日实际运行期间的SOC曲线如图1所示。由图可见,储能电站的SOC变化很小,基本在0.5左右的小范围内波动。

在实际的调频过程中,储能上、下调频交替运行,在连续充电一段时间后会相应地放电一段时间,

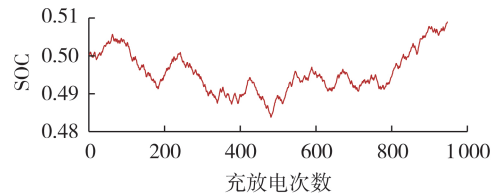


图1 储能电站的SOC曲线

Fig.1 SOC curve of energy storage station

遵循能量中性原则。在储能参与调频的实际过程中,每次响应的平均持续时间约为4 s。储能具有极快的响应速度,能在几秒内大幅增减出力,但因其响应持续时间短,每次的响应能量变化都不大。

基于上述分析,本文算例选取的运行日内储能的容量均衡因子取值均为0.5,储能的出清价格不发生改变,上述出清过程和最终调频成本也不发生变化。

3.1.6 价格排序

为了充分体现各调频资源参与调频的物理性能,本文假设各资源的原始报价相同(报价取其他值不影响本文模型、方法与机制的适用性),参考文献[15]将原始里程报价设定为8元/MW,原始容量报价设定为0.33元/MW。为了避免性能较差的火电机组无限制抬高市场出清的里程价格,设置里程价格的上限为15元/MW。

资源的报价根据调频性能指标进行调整后可作为调频资源排序的依据。以上述典型时段39为例,该时段的模拟出清结果如表1所示。基于3.1.1节中的假设条件,可认为算例已取得机组组合结果,故虽经时段39内抽水蓄能1经调频性能指标调整后的价格排序靠前,但其并无中标容量。

表1 典型时段调频资源的模拟出清结果

Table 1 Simulation clearing results of frequency modulation resources in a typical period

资源	容量价格 / (元·MW ⁻¹)		里程价格 / (元·MW ⁻¹)		综合价格 / (元·MW ⁻¹)		中标容量 / MW	
	上调 频	下调 频	上调 频	下调 频	上调 频	下调 频	上调 频	下调 频
抽水蓄能1	0.48	0.47	11.47	11.40	11.95	11.87	0	0
抽水蓄能2	0.49	0.47	11.76	11.24	12.25	11.71	150	150
储能3	0.35	0.36	8.31	8.53	8.66	8.88	55	55
火电4	1.04	1.08	15.00	15.00	16.04	16.08	0	0
火电5	1.89	1.49	15.00	15.00	16.89	16.49	0	0
火电6	3.33	3.33	15.00	15.00	18.33	18.33	0	0
火电7	1.52	1.55	15.00	15.00	16.52	16.55	0	0
水电8	0.53	0.50	12.67	12.01	13.20	12.51	30	30
水电9	0.62	0.59	14.99	14.18	15.61	14.77	0	0
水电10	0.52	0.51	12.43	12.34	12.95	12.86	30	0
火电11	1.13	0.56	15.00	13.53	16.13	14.09	0	0
火电12	0.56	1.07	13.48	15.00	14.04	16.07	76	0
水电13	0.50	0.47	12.06	11.32	12.56	11.79	70	70
水电14	0.48	0.50	11.62	12.06	12.10	12.56	70	17

3.2 多情景结算分析

3.2.1 只考虑综合性能指标对报价进行调整

计及上述约束条件,可根据表 1 中各资源的综合价格进行排序,根据价格从低到高的顺序对各资源依次进行调用,直至满足时段内的调频容量需求,最后中标的资源报价为该时段的调频辅助服务市场出清价格。一天内各时段调频资源的中标容量见附录 A 图 A2。由图可看出,储能、抽水蓄能和性能较好的水电机组优先中标,边际机组大多为火电机组,调频辅助服务市场具有较高的出清价格。

各时段的调频出清价格见图 2,在同样的初始报价下,性能指标越差的资源经调整后的报价越高,被调用的顺序越靠后。故当所需投入的调频资源数量越多时,出清的边际价格相应越高。在只考虑综合调频性能指标时,大多数时段调频辅助服务市场的里程价格能达到并维持在上限 15 元 / MW 附近,且波动范围小。计算调频容量收益时,取资源容量有效率 $\eta=95\%$,而调频里程取某一天内的实际情况进行分析。

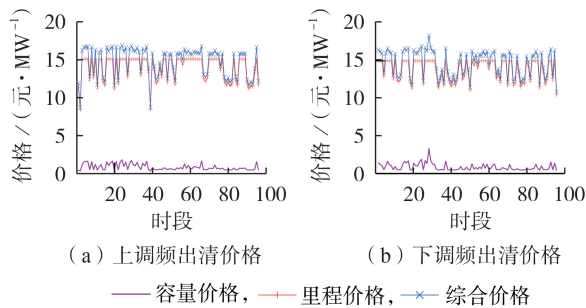


图 2 调频出清价格

Fig.2 Frequency modulation clearing price

各资源的容量占比和收益占比如表 2 所示。可以看出,相较于传统资源,快速调频资源提供相同里程时所需的容量小得多,能以更少的容量支出获得更多的日调频补偿收益。

表 2 单日调频资源的容量和收益占比

Table 2 Capacity and revenue share of frequency modulation resources in a single day

资源	日最大容量占比 / %	日收益占比 / %
抽水蓄能	30.46	22.48
储能	5.58	27.74
火电机组	40.61	4.68
水电机组	23.35	45.10

各调频资源的收益见附录 A 表 A4。一天内的调频总收益为 76.3 万元,调频收益主要由资源实际提供的调频里程进行衡量。其中储能的调频收益为 20.9 万元,所有火电机组的调频总收益仅为 3.7 万元,可见储能、水电机组等调频性能较好的资源所获调频收益远高于传统火电机组,综合性能指标的设置

可使市场资金更多地流向调频性能好的资源。

3.2.2 考虑效率因子对出清价格进行调整

根据日调频容量需求计算各时段的效率因子,然后将实际的物理容量换算成调频资源的效用容量,以此作为容量的出清依据。以上述典型时段为例,各调频资源的效率因子大小如表 3 所示。若调频资源在某时段不参与调频辅助服务市场,则将其效率因子取值为 0。效率因子能具体量化快速调频资源和传统调频资源的调频性能,市场内调频资源之间的性能差异越大,则效率因子的作用越明显。

表 3 各资源的效率因子大小

Table 3 Efficiency factor of each resource

资源	上调频效率因子	下调频效率因子	资源	上调频效率因子	下调频效率因子
抽水蓄能 1	0	0	水电 8	1.50	1.44
抽水蓄能 2	1.41	1.55	水电 9	0	0
储能 3	2.28	2.54	水电 10	1.43	1.71
火电 4	0.80	1.03	火电 11	0.95	1.06
火电 5	1.01	1.12	火电 12	1.40	1.20
火电 6	0	0	水电 13	1.41	1.73
火电 7	0.72	0.50	水电 14	1.42	1.59

为了进一步直观说明效率因子的作用,引入典型时段的容量出清结果对考虑效率因子前、后的调频资源中标容量进行对比,结果如图 3 所示。其中典型时段内系统的上调频物理容量需求在考虑效率因子后下降了 36.3%,下调频物理容量需求的降幅达到 46.5%。

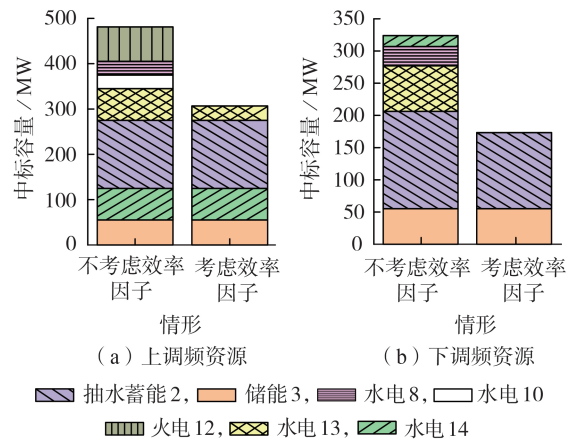


图 3 考虑效率因子前、后的中标容量对比

Fig.3 Comparison of bidding capacity between considering and without considering efficiency factor

全时段考虑效率因子后的调频资源容量需求见附录 A 图 A3。对比图 A2 和图 A3 可直观看出:考虑效率因子后系统调频容量需求减少,可更好地衡量资源的调频价值;同时,因调频容量需求减少而退出调频辅助服务市场的资源还可运用于其他市场,实现了资源节约。

随着系统调频需求容量减少,市场出清价格降

低。考虑效率因子后的出清价格如图4所示。可以看出,相较于图2中考虑效率因子前的边际价格,考虑效率因子后的出清价格明显下降。

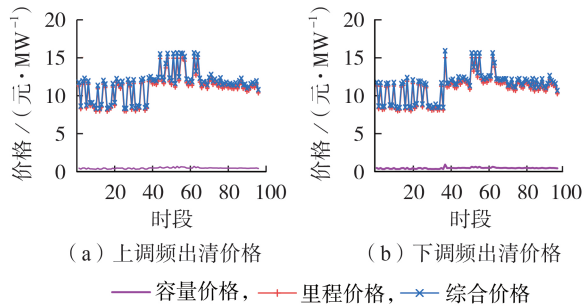


图4 考虑效率因子后的出清价格

Fig.4 Clearing price considering efficiency factor

因电化学储能和抽水蓄能的调节性能显著优于传统调频资源,它们的综合调频性能指标能达到传统火发电机组的3倍及以上,故引入效率因子后系统的调频总成本有较大幅度的减少,相较于考虑效率因子前,系统节省了约18.1%的成本。其中火电机组因调频性能较差,其收益占比进一步降至0.96%,而储能凭借优异的调频能力收获36.7%的收益占比。具体的收益见附录A表A5。

3.2.3 储能对调频辅助服务市场的影响

算例所取的运行日仅在前39个时段有电化学储能参与调频辅助服务市场,为了进一步分析储能对调频辅助服务市场的影响,以下通过选取这些时段并设置无储能场景进行对比分析。由前文可知,效率因子的设置对市场的出清有较大的影响,故下文均为考虑效率因子后的情形。

对于无储能参与的市场,原来由电化学储能承担的调频容量和调频里程应由其余资源承担,故需要更多调频资源和调频容量的投入,这会导致系统的出清价格增大。调频辅助服务市场有、无储能时的出清价格如图5所示。因在考虑效率因子且有储能参与的场景下,有、无限价对出清价格的影响不大,仅在下调频时段37,无限价的出清价格相比有限价的情况高了7.26元/MW左右,故图5未给出有储能无限价场景的结果。

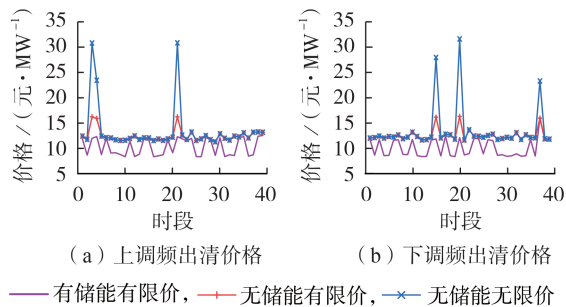


图5 有、无储能时的出清价格

Fig.5 Clearing price with and without energy storage

为了满足系统的调频里程需求,对原来由储能承担的调频里程和因考虑效率因子而未中标的机组承担的调频里程进行重新分配。因效率因子与里程调用率都能反映资源的调频性能,且两者近似成正比关系,前文已计算得到效率因子的大小,此处用其来分摊实际调频里程,结果见附录A图A4,主要通过调用水电机组来分担这部分调频里程。

为了分析储能参与调频以及市场设定的价格上限对系统调频成本的影响,设置4种场景进行对比,结果如表4所示。从表中可看出:设置市场里程价格上限可有效降低系统总调频成本,而目前储能参与调频辅助服务市场会使系统成本升高。各资源的具体收益变化见附录A表A6和表A7。

表4 不同场景的总调频收益对比

Table 4 Comparison of total frequency modulation revenue among different scenarios

场景	调频资源收益 / 元				
	抽水蓄能	储能	火电机组	水电机组	总计
有储能 有限价	5975.85	227903.40	474.71	40258.23	274612.10
无储能 有限价	7921.24	0	4224.50	228170.47	240316.20
有储能 无限价	5975.85	228814.00	696.30	41743.03	277229.17
无储能 无限价	7921.24	0	753.19	244681.03	259749.44

储能参与调频辅助服务市场后系统总调频成本增大的主要原因在于储能具有较高的性能指标。即使储能参与调频会使市场的边际价格有所下降,但边际价格的下降幅度较小,它对于成本的下降作用小于储能高性能指标使成本上升的力度。另外,在有限价的情况下,储能参与调频后系统的调频成本更大,大约提高了14.3%;在无限价的情况下,储能参与调频后系统的调频成本增大了6.7%。无限价场景下系统调频成本的增幅变小,原因在于:无储能参与时的边际价格提升程度更大,缩小了与原来有储能时市场总调频成本的差距。进一步结合图5可看出:无储能无限价场景下里程价格越限的时段并不多,对于减少调频成本差距的作用并不突出,结果仍为有储能参与调频时的系统总调频成本更大。

基于上述对比分析可看出,调频辅助服务市场中引入储能在经济性方面仍不占优,主要有以下三方面原因:①容量价格和里程价格差距过大,导致系统的调频成本与机组的调频容量关系不大,而投入储能的主要作用是减少系统的调频物理容量需求,容量价格过低会无法明显降低调频辅助服务市场的总成本,难以体现储能调频的经济性;②储能参与调频后凭借其优异的性能降低了系统的出清价格,这也是降低系统总调频成本的主要手段,而设置里程

价格上限后削弱了这一因素的影响;③不同资源的综合调频性能指标差异较大,例如常规火电机组的综合调频性能指标较低,按照结算规则,若用其替代完成与储能相同的调频里程,则系统所需要支付的调频里程成本减少。

针对上述问题,本文提出以下建议:①降低市场里程价格与容量价格的比值,可参考广东省调频辅助服务市场将里程价格取值设定为容量价格的2~5倍^[13],通过削减调频里程收益的比重,使系统在完成相同的调频任务时可支付更少的调频成本;②调整市场的报价上限,合理放宽对边际价格的约束,从而更好地凸显储能参与调频辅助服务市场的经济性,而调频辅助服务市场中资源的报价策略和系统调频容量需求变化均可能影响市场报价上限的设置。

统计运行日的数据表明,储能参与调频后系统的综合调频性能指标得到提升,储能的调频容量在占系统平均调频容量的4.7%时承担了16.9%的调频里程,具有传统调频资源无法比拟的优势。储能参与调频辅助服务市场能减少二次调频资源,使其他机组无需预留AGC容量,从而可以在更经济的状态下运行,起到降低能量市场运行成本的作用。

4 结论

本文设计了储能参与调频辅助服务市场后的市场机制,并在此基础上以系统调频成本最小为目标,建立了线性模型进行优化出清。以某省实际运行日调频数据为算例,分析综合调频性能指标、效率因子和容量均衡因子对系统调频总成本的影响,并设置了无储能场景进行对比分析,所得结论如下。

1)综合调频性能指标的设置使调频资源的收益与自身提供的服务质量相关联,储能的日平均综合调频性能指标约为传统火电机组的3.3倍,可凭借其优异的性能获得5.9倍于火电机组的日调频收益,从而鼓励各资源提升自身服务水平的积极性。

2)加入效率因子后,利用效用容量达到节省调频物理容量的目的,使总调频成本下降了18.1%。

3)在调度周期前5 min市场中考考虑容量均衡因子,使储能运行在良好的SOC,在系统出现功率缺额时保证储能至少存有10%的可用容量参与调频。

4)在容量价格远小于里程价格、调频资源性能指标差异大、价格上限设置较为严格的情况下,储能参与可能使系统的调频经济性能有一定程度的降低。但随着储能技术的发展和储能成本的降低,未来储能在调频辅助服务市场中可以进一步降低出清价格,从而提升调频辅助服务市场的社会效益。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 姜惠兰,蔡继朝,肖瑞,等.一种提高系统频率响应特性的风储协调控制策略[J].电力自动化设备,2021,41(7):44-51.
JIANG Huilan, CAI Jizhao, XIAO Rui, et al. A wind-storage coordinated control strategy for improving system frequency response characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(7): 44-51.
- [2] 张圣祺,袁蓓,徐青山,等.规模化储能参与下的电网二次调频优化控制策略[J].电力自动化设备,2019,39(5):82-88.
ZHANG Shengqi, YUAN Bei, XU Qingshan, et al. Optimal control strategy of secondary frequency regulation for power grid with large-scale energy storages[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(5): 82-88.
- [3] 赵源筱,耿光超,江全元,等.考虑功率变化速率的储能辅助单机调频控制策略[J].电力自动化设备,2020,40(1):141-147.
ZHAO Yuanxiao, GENG Guangchao, JIANG Quanyuan, et al. Frequency control strategy of single-generator supporting by energy storage considering power change rate[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1): 141-147.
- [4] 胡泽春,罗浩成.大规模可再生能源接入背景下自动发电控制研究现状与展望[J].电力系统自动化,2018,42(8):2-15.
HU Zechun, LUO Haocheng. Research status and prospect of automatic generation control with integration of large-scale renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(8): 2-15.
- [5] 王育飞,杨铭诚,薛花,等.计及SOC的电池储能系统一次调频自适应综合控制策略[J].电力自动化设备,2021,41(10):192-198,219.
WANG Yufei, YANG Mingcheng, XUE Hua, et al. Self-adaptive integrated control strategy of battery energy storage system considering SOC for primary frequency regulation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 192-198, 219.
- [6] 谢志佳,王佳蕊,李德鑫,等.储能系统参与电力系统调频经济性评估研究[J].电器与能效管理技术,2020(5):14-20.
XIE Zhijia, WANG Jiarui, LI Dexin, et al. Economy evaluation of energy storage system participating in power system frequency modulation[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2020(5): 14-20.
- [7] 王泽爽,陈嘉俊,朱建全,等.计及循环寿命的储能优化配置与运营策略[J].电力自动化设备,2021,41(10):75-81.
WANG Zeshuang, CHEN Jiajun, ZHU Jianquan, et al. Optimal configuration and operation strategy of energy storage considering cycle life[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 75-81.
- [8] PUSCEDDU E, ZAKERI B, CASTAGNETO GISSEY G. Synergies between energy arbitrage and fast frequency response for battery energy storage systems[J]. Applied Energy, 2021, 283: 116274.
- [9] 杨家琪,喻洁,田宏杰,等.考虑新能源性能风险的调频辅助服务市场出清与调度策略[J].电力系统自动化,2020,44(8):66-73.
YANG Jiaqi, YU Jie, TIAN Hongjie, et al. Clearing and scheduling strategy of frequency regulation ancillary service market considering performance risk of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(8): 66-73.
- [10] 梁彦杰,陈星,娄素华,等.南方(以广东起步)调频辅助服务市场卡特尔形成机理分析[J].电力系统自动化,2021,45(15):93-100.
LIANG Yanjie, CHEN Xing, LOU Suhua, et al. Formation mechanism analysis of cartel in frequency regulation ancillary service market in Southern China (starting from Guangdong

- Province)[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(15):93-100.
- [11] 张鸿宇, 王宇. 国外电网侧储能电站参与调频辅助服务市场的机制经验及对我国的启示[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(2): 766-773.
- ZHANG Hongyu, WANG Yu. Mechanism experience of foreign grid-side storage participating in frequency regulation auxiliary service market and its enlightenment to China[J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(2):766-773.
- [12] 国家能源局华北监管局. 华北区域并网发电厂“两个细则”(2019年修订版)[EB/OL]. (2019-09-30)[2021-08-09]. <http://hbj.nea.gov.cn/adminContent/initViewContent.do?pk=0000000-06c2a4364016d7de32f4d01f5>.
- [13] 南方能源监管局. 南方能源监管局发布《广东调频辅助服务市场交易规则(试行)》[EB/OL]. (2018-08-09)[2021-08-09]. <http://nfj.nea.gov.cn/adminContent/initViewContent.do?pk=402881e564f399bb01651c8a97dd0024>.
- [14] 国家能源局江苏监管办公室. 江苏电力辅助服务(调频)市场交易规则(试行)[EB/OL]. (2020-07-03)[2021-08-09]. <http://jsb.nea.gov.cn/news/2020-7/202073154200.htm>.
- [15] 国家能源局福建监管办公室. 福建能源监管办关于印发《福建省电力调频辅助服务市场交易规则(试行)(2019年修订版)》的通知(闽监能市场[2019]113号)[EB/OL]. (2020-01-03)[2021-08-09]. http://fjb.nea.gov.cn/news_view.aspx?id=30428.
- [16] 国家能源局山东监管办公室. 山东能源监管办关于《山东电力辅助服务市场运营规则(试行)(2021年修订版)(征求意见稿)》公开征求意见的公告[EB/OL]. (2021-09-03)[2021-12-07]. http://www.cnea.gov.cn/tzgg/content_6873.
- [17] 李欣然, 黎淑娟, 黄际元, 等. 储能电池参与电网二次调频的高效性评估[J]. 太阳能学报, 2019, 40(9):2608-2615.
- LI Xinran, LI Shujuan, HUANG Jiyuan, et al. Efficiency analysis of energy storage battery participating in secondary frequency regulation[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2019, 40(9):2608-2615.
- [18] 黄昊, 吴继平, 滕贤亮, 等. 基于Fréchet算法的电化学储能AGC控制性能评价指标[J]. 中国电力, 2020, 53(1):108-114.
- HUANG Hao, WU Jiping, TENG Xianliang, et al. Performance indices of electrochemical energy storage for AGC control based on the discrete Fréchet algorithm[J]. Electric Power, 2020, 53(1):108-114.
- [19] 陈浩, 贾燕冰, 郑晋, 等. 规模化储能调频辅助服务市场机制及调度策略研究[J]. 电网技术, 2019, 43(10):3606-3617.
- CHEN Hao, JIA Yanbing, ZHENG Jin, et al. Research on market mechanism and scheduling strategy of frequency regulation auxiliary service of large-scale energy storage[J]. Power System Technology, 2019, 43(10):3606-3617.
- [20] 仇进, 吴继平, 滕贤亮, 等. 适应辅助服务市场化的自动发电控制调频容量实时计算方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(8):16-21.
- QIU Jin, WU Jiping, TENG Xianliang, et al. Real-time calculation method for frequency modulation capacity of automatic generation control adapting to auxiliary service marketization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(8):16-21.

作者简介:



林阿竹

林阿竹(1999—),女,硕士研究生,主要研究方向为电力系统优化运行与电力市场(E-mail:linazhu9918@163.com);

柯清辉(1970—),男,高级经济师,工程师,主要研究方向为新型电力系统、柔性直流、现代智慧供应链(E-mail:xmkqh@sohu.com);

江岳文(1977—),女,教授,博士,通信作者,主要研究方向为风电并网优化运行、电力系统优化运行等(E-mail:jiangyuewen2008@163.com)。

(编辑 陆丹)

Market mechanism design of independent energy storage participating in frequency modulation auxiliary service market

LIN Azhu¹, KE Qinghui², JIANG Yuewen^{1,3,4}

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. State Grid Fujian Electric Power Materials Co., Ltd., Fuzhou 350013, China;

3. Fujian Province University Engineering Research Center of Smart Distribution Grid Equipment, Fuzhou 350108, China;

4. Fujian Smart Electrical Engineering Technology Research Center, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Under the background of green and low-carbon energy transition, the FM(Frequency Modulation) gap of power system is increasing. Energy storage has great performance advantage in FM auxiliary service market. Reasonable market mechanism can correctly guide energy storage to provide auxiliary service orderly and obtain benefits. Therefore, a series of FM performance indexes of regulation accuracy, response time, regulation speed are set, and the efficiency factor is introduced to reflect the advantages of fast FM resources, and the market is encouraged to actively introduce high-quality energy storage FM resources to optimize the allocation of FM resources in the system. Considering the real-time state of charge of energy storage, the capacity balance factor is set to adjust the pricing strategy of energy storage, the influence of the scenarios with and without energy storage on the system FM is compared and analyzed, and the advantages of independent energy storage participating in the FM auxiliary service market and the problems that need to be improved are objectively analyzed. An example is given to verify the effectiveness of the proposed mechanism.

Key words: independent energy storage; frequency modulation auxiliary service; performance index; efficiency factor; capacity equalization factor; market mechanism

附录 A

表 A1 AGC 可调节容量
Table A1 Adjustable capacity of AGC resources

资源	装机容量/MW	AGC 可调节容量/MW	资源	装机容量/MW	AGC 可调节容量/MW
抽水蓄能 1	300	150	水电 8	120	30
抽水蓄能 2	300	150	水电 9	120	30
储能 3	30	55	水电 10	120	30
火电 4	600	60	火电 11	400	80
火电 5	600	60	火电 12	400	80
火电 6	600	60	水电 13	200	70
火电 7	600	60	水电 14	200	70

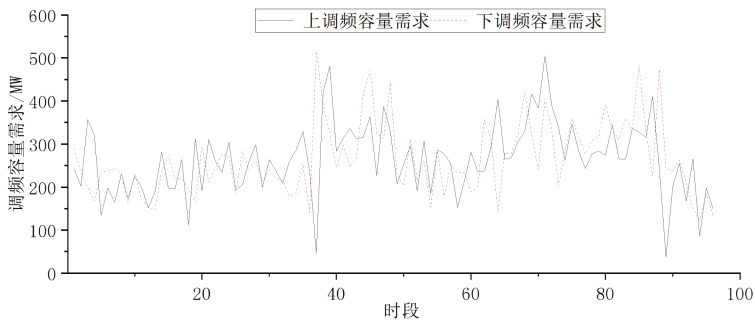


图 A1 各时段的调频容量需求
Fig.A1 Frequency modulation capacity demand in each period

表 A2 各资源的死区范围
Table A2 Dead zone of each resource

资源	调差系数/%	频率死区/Hz	死区出力范围/MW
300 MW 火电	5	0.033	3.96
100 MW 火电	5	0.033	1.32
70 MW 水电	3	0.050	2.33
30 MW 水电	3	0.050	1.00
150 MW 抽水蓄能	3	0.050	5.00

表 A3 资源的调频性能指标计算结果
Table A3 Calculative results of frequency modulation performance indexes of resources

资源	上调频				下调频			
	调节精度	响应时间	调节速度	综合调频性能指标	调节精度	响应时间	调节速度	综合调频性能指标
抽水蓄能 1	0.82	0.46	0.68	0.70	0.83	0.46	0.69	0.70
抽水蓄能 2	0.86	0.43	0.57	0.68	0.87	0.46	0.64	0.71
储能 3	1.00	1.00	0.85	0.96	1.00	1.00	0.76	0.94
火电 4	0.29	0.60	0.10	0.32	0.27	0.61	0.10	0.31
火电 5	0.10	0.41	0.10	0.18	0.10	0.60	0.10	0.22
火电 6	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
火电 7	0.17	0.43	0.10	0.22	0.12	0.52	0.10	0.22
水电 8	0.76	0.82	0.17	0.63	0.80	0.85	0.21	0.67
水电 9	0.58	0.84	0.15	0.53	0.63	0.85	0.16	0.56
水电 10	0.76	0.86	0.18	0.64	0.77	0.87	0.19	0.65
火电 11	0.22	0.64	0.10	0.30	0.70	0.83	0.15	0.59
火电 12	0.73	0.81	0.11	0.59	0.21	0.73	0.10	0.31
水电 13	0.87	0.67	0.25	0.66	0.92	0.70	0.30	0.71
水电 14	0.89	0.69	0.29	0.69	0.84	0.67	0.30	0.66

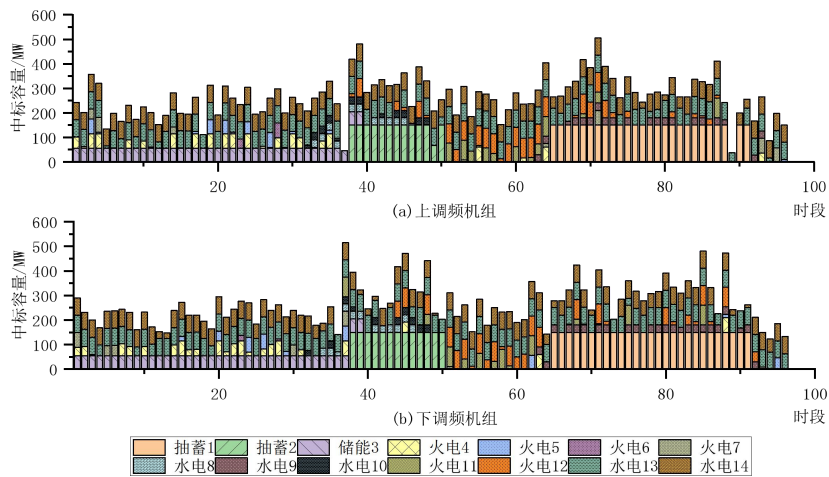


Fig.A2 Bidding capacity of frequency modulation resources

表 A4 调频资源的收益

Table A4 Profits of frequency modulation resources

资源	上调频			下调频		
	容量收益/元	里程收益/元	总收益/元	容量收益/元	里程收益/元	总收益/元
抽水蓄能 1	1388	58709	60097	1619	63469	65089
抽水蓄能 2	632	23553	24184	708	21317	22025
储能 3	2135	104861	106996	2142	102372	104514
火电 4	415	3745	4160	338	2939	3276
火电 5	181	1527	1708	175	1262	1437
火电 6	26	171	197	9	65	74
火电 7	104	699	802	88	728	816
水电 8	158	3906	4063	146	3896	4042
水电 9	269	9362	9630	312	12569	12881
水电 10	144	2916	3060	120	2733	2853
火电 11	232	3133	3365	289	2662	2952
火电 12	628	8324	8953	683	7284	7968
水电 13	3271	80662	83933	3552	84396	87947
水电 14	3329	64722	68051	3145	64293	67438
总计	12911	366289	379200	13326	369986	383312

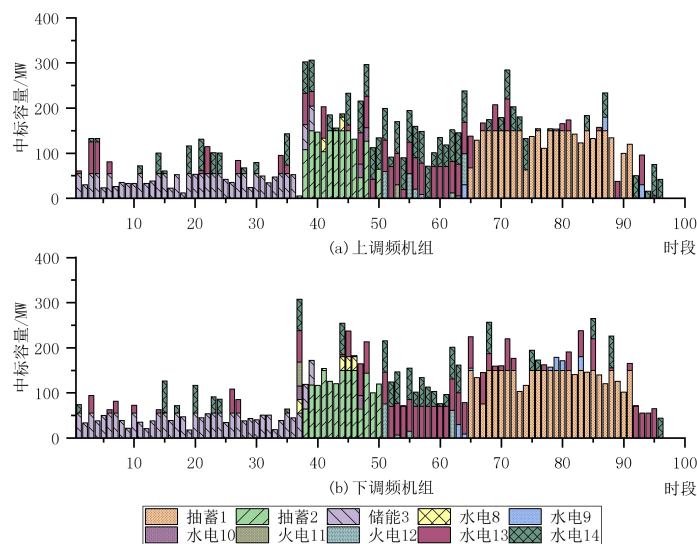


Fig.A3 Bidding capacity of frequency modulation resources with considering efficiency factor

表 A5 考虑效率因子后调频资源的收益

Table A5 Profits of frequency modulation resources after considering efficiency factor

资源	上调频			下调频		
	容量收益/元	里程收益/元	总收益/元	容量收益/元	里程收益/元	总收益/元
抽水蓄能 1	976	69686	70662	1094	73928	75022
抽水蓄能 2	438	23681	24118	469	27285	27753
储能 3	682	113313	113996	691	114210	114901
火电 4	0	0	0	0	0	0
火电 5	0	0	0	0	0	0
火电 6	0	0	0	0	0	0
火电 7	0	0	0	0	0	0
水电 8	21	1542	1562	48	4060	4107
水电 9	32	3620	3653	44	5852	5897
水电 10	17	471	488	24	692	716
火电 11	7	529	535	19	458	477
火电 12	55	2992	3047	34	1895	1929
水电 13	624	44444	45068	728	51017	51745
水电 14	731	47276	48007	430	30417	30847
总计	3584	307553	311137	3581	309814	313395

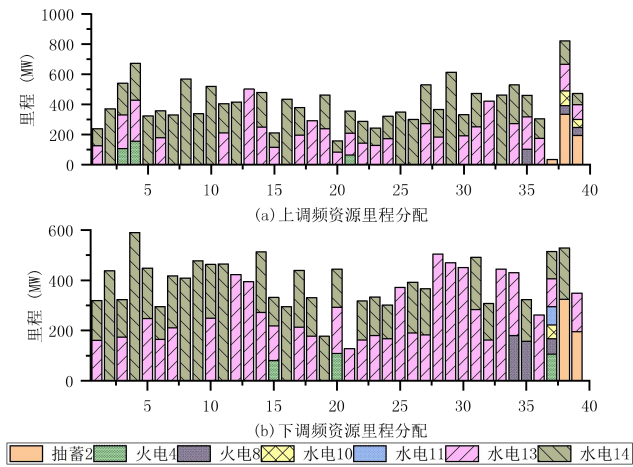


Fig.A4 Allocation results of frequency modulation mileage

表 A6 有限价场景的总调频成本

Table A6 Total frequency modulation cost of scene with limited price

资源	有储能时总调频成本/元	无储能时总调频成本/元	有储能成本增量/元
抽水蓄能 1	0	0	0
抽水蓄能 2	5975.85	7921.24	-1945.39
储能 3	27903.40	0	227903.40
火电 4	0	3708.12	-3708.12
火电 5	0	0	0
火电 6	0	0	0
火电 7	0	0	0
水电 8	554.49	5054.85	-4500.36
水电 9	0	0	0
水电 10	444.79	1743.22	-1298.43
火电 11	474.71	516.38	-41.68
火电 12	0	0	0
水电 13	19868.88	103372.60	-83503.72
水电 14	19390.07	117999.80	-98609.73
总计	274612.10	240316.20	34295.90

表 A7 无限价场景的总调频成本

Table A7 Total frequency modulation cost of scene without limited price

资源	有储能时总调频成本/元	无储能时总调频成本/元	有储能成本增量/元
抽水蓄能 1	0	0	0
抽水蓄能 2	5975.85	7921.24	-1945.39
储能 3	228814.00	0.00	228814.00
火电 4	0	6393.98	-6393.98
火电 5	0	0	0
火电 6	0	0	0
火电 7	0	0	0
水电 8	817.68	5350.65	-4532.97
水电 9	0	0	0
水电 10	654.92	1978.82	-1323.90
火电 11	696.30	753.19	-56.89
火电 12	0	0	0
水电 13	20379.46	111792.37	-91412.92
水电 14	19890.97	125559.19	-105668.22
总计	277229.17	259749.44	17479.72