

## 计及调频优化特性的风-光-储机组参与联合出清模型

郭府, 杨坤柔, 米阳, 马思源

引用本文:

郭府, 杨坤柔, 米阳, 等. 计及调频优化特性的风-光-储机组参与联合出清模型[J]. 上海电力大学学报, 2025, 41(6): 579-587.

GUO Fu, YANG Kunrou, MI Yang, et al. Joint Clearing Model for Wind-Photovoltaic-Storage Units with Frequency Regulation Optimization Characteristics[J]. *Journal of Shanghai University of Electric Power*, 2025, 41(6): 579-587.

## 相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

### 并网机组一次调频和AGC性能考核在线监测与评估系统

An On-line Monitoring and Evaluation System of Primary Frequency Modulation and AGC Performance Assessment of Gridconnected Units

上海电力大学学报. 2021, 37(4): 324-329,334 <https://doi.org/10.3969/j.issn.2096-8299.2021.04.003>

### 储能系统应用于火电厂调频经济性评价的研究

Study on Application of Energy Storage System to Economic Evaluation of Power Plant Frequency Regulation

上海电力大学学报. 2019, 35(5): 479-485,492 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-4729.2019.05.013>

### 含风电系统的备用问题研究

Research on the Problem of Active Power Reserve with Wind Power Penetration

上海电力大学学报. 2018, 34(6): 547-551,557 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-4729.2018.06.007>

### 二次再热机组烟气余热利用优化方案研究

Second Reheat Unit Flue Gas Waste Heat Utilization Optimization Research

上海电力大学学报. 2018, 34(5): 427-432 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-4729.2018.05.003>

### 火电机组参与风光消纳的问题分析及建议

Key Problem Analysis and Suggestion on Thermal Power Unit Participation in Wind and Solar Power Accommodation

上海电力大学学报. 2019, 35(6): 539-543,572 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-4729.2019.06.006>

DOI: 10.3969/j.issn.2096-8299.2025.06.009

# 计及调频优化特性的风-光-储机组参与联合出清模型

郭 府<sup>1</sup>, 杨坤柔<sup>2</sup>, 米 阳<sup>1</sup>, 马思源<sup>1</sup>

(1. 上海电力大学, 上海 200090; 2. 国网上海市电力公司嘉定供电公司, 上海 201899)

**摘要:** 随着新能源大规模并网, 新能源消纳、调频性能指标优化以及电力市场联合出清问题日益突出。采用模糊层次分析法对调频性能指标进行优化, 根据不同储能机组特性进行分区调频, 构建了风-光-储机组参与调频容量动态申报的联合出清模型。算例分析表明, 优化后的调频性能指标可以更准确地反映各种机组调频性能的差异, 合理平衡各种机组参与电能量和调频市场的中标容量分配; 所提模型降低了联合出清成本, 提升了调频收益, 同时促进了新能源消纳。

**关键词:** 模糊层次分析法; 电力市场; 联合出清

中图分类号: TM715

文献标志码: A

文章编号: 2096-8299(2025)06-0579-09

## Joint Clearing Model for Wind-Photovoltaic-Storage Units with Frequency Regulation Optimization Characteristics

GUO Fu<sup>1</sup>, YANG Kunrou<sup>2</sup>, MI Yang<sup>1</sup>, MA Siyuan<sup>1</sup>

(1. Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. State Grid Shanghai Jiading Electric Power Supply Company, Shanghai 201899, China)

**Abstract:** With the large-scale grid integration of renewable energy, issues in renewable energy accommodation, optimization of frequency regulation performance metrics, and joint electricity market clearing have become prominent. A fuzzy analytic hierarchy process is employed to optimize frequency regulation performance metrics, while leveraging diverse storage characteristics for zonal frequency regulation. This establishes a dynamic capacity declaration framework for wind-photovoltaic-storage units participating in the frequency regulation. Case study validation demonstrates that the optimized frequency regulation performance metrics can better differentiate performance variations among generation units, thereby rationally balancing capacity allocation for successful bids in both energy and frequency regulation markets. The proposed model reduces joint clearing costs while enhancing frequency regulation revenues and renewable energy accommodation.

**Key words:** fuzzy analytic hierarchy process; electricity market; joint clearing

收稿日期: 2025-04-03

通信作者简介: 郭府 (1999—), 男, 在读硕士。主要研究方向为电力市场出清以及新能源消纳。E-mail: suepguofu@163.com。

近年来,关于电力市场机制的研究日益增多。国内电能量和调频市场出清机制主要包含联合出清和独立出清。相较于独立出清,联合出清可以降低出清成本,提升经济效益,同时能更好地保障系统稳定性和可靠性<sup>[1-4]</sup>。在联合出清研究领域,现有成果大多聚焦于储能机组特性及联合市场机制。例如:文献[5]探讨了多主体参与的联合市场机制,采用两阶段分层边界成本比较型竞价模式,协调多主体利益,探索了省内、省间能量交易的可行性;文献[6]基于Stackelberg博弈的动态竞价模型,研究了储能机组参与联合市场交易的路径,在平衡成本与运营主体利益的同时,提升了储能机组参与电力市场的灵活性;文献[7]提出了储能机组参与调频能量损耗的联合出清模型,反映了储能机组灵活能量状态与报价模式的关系;文献[8]考虑储能机组充放电深度、速率老化等因素,通过申报不同机组状态下的报价成本,释放了储能机组深度放电能力;文献[9]以独立储能机组为研究主体,对比其参与调频市场顺次出清与联合出清的差异,探讨了独立储能机组参数申报、市场电价与购电成本间的关系。上述研究大多仅考虑了联合出清中储能机组的充放电状态、老化成本等因素的影响,并未涉及多种新型能源共同参与联合出清的相关研究,以及多种能源参与调频市场容量分配的具体机制。

关于新能源参与联合出清的研究主要围绕单一新能源参与电力市场展开。例如,文献[10]提出了光伏可行度指标及两种补偿机制,分析了光伏机组参与调频交易的流程。在多能源参与联合出清的研究方面,成果主要有:文献[11]构建了多种能源参与电能量和调频市场的出清模型,验证了储能机组可提高新能源消纳水平、改善火电机组调频效果,但未对储能机组参与调频市场进行深入研究;文献[12]提出了双结算机制下抽水蓄能与风光机组(包含风电机组和光伏机组)参与日前-实时两阶段随机优化模型,采用条件风险价值量化新能源输出功率的不确定性,实现了投标优化和滚动自调度优化,但未考虑如何量化分析各种机组调频性能。上述研究均缺乏综合考量不同机组调频性能差异及电能量和调频市场滚动出清的方法。

基于上述分析,本文提出了利用模糊层次分析法(Fuzzy Analytic Hierarchy Process, FAHP)优

化调频性能指标。相较于传统层次分析法,FAHP通过模糊化权重计算过程,可有效降低专家评判的主观性;通过修正各机组权重,有助于提升储能机组在调频市场中的中标概率,同时提高火电机组在电能量市场的中标容量。在此基础上,构建多种机组参与电能量市场预出清模型,动态申报机组调频出清容量;以调频出清成本最小为目标函数,结合修正后的容量边际,再次开展电能量市场出清。

## 1 调频容量动态申报下联合出清框架

结合文献[13]可知,在调频市场开启的前15 min,电能量市场可以计算未来1 h的节点电价,进而通过该节点电价计算调频市场预估机会成本;时前调频市场根据调频里程报价、调频容量报价及预估机会成本,计算日内调频市场实时运行时段(1 h)的中标机组调频容量。电能量市场日内实时滚动,每5 min更新迭代一次。基于风电-光伏-储能(以下简称“风-光-储”)机组的调频特性及各机组的机会成本、边际条件等因素,动态申报调频容量的联合出清模型如图1所示。

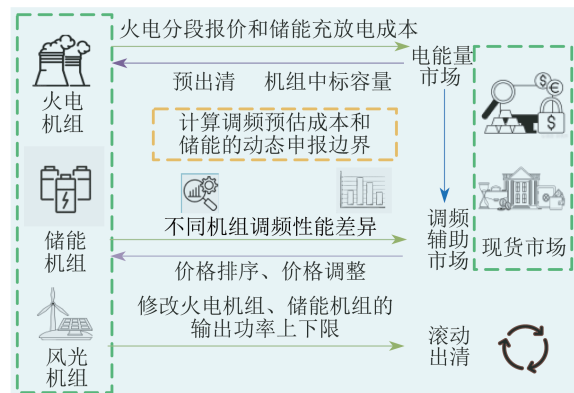


图1 动态申报调频容量的联合出清模型

图1中,该模型包含3个部分:一是电能量市场预出清,需分别考虑火电分段报价和储能机组充放电成本,以电能量市场运行成本最小为目标函数,计算调频预估成本和储能机组的动态申报边界;二是调频辅助市场出清,根据不同机组调频性能的差异,采用FAHP赋予不同权重,修改调频性能指标参数,以调频成本最小为目标函数,初步确定调频出清容量;三是滚动出清,根据调频中标容量进行价格排序和价格调整,修改火电机组、储能机组的输出功率上下限,将传统火

发电机组的剩余容量纳入电能量市场出清,通过叠加调频指令计算实际的机会成本,最终实现联合出清。

## 2 电能量市场出清模型

### 2.1 目标函数

以风-光-储机组参与电能量市场的运行成本最小为目标函数<sup>[14]</sup>,公式如下:

$$\min F^e = \sum_t \sum_i C_{h,i,t} P_{h,i,t} + \sum_t \sum_j C_{wp,j,t} P_{wp,j,t} + \sum_t \sum_s (\lambda_{c,s,t}^f P_{c,s,t}^f - \lambda_{c,s,t}^{ch} P_{c,s,t}^{ch}) \quad (1)$$

式中: $F^e$ ——电能量市场运行结算成本;

$C_{h,i,t}$ —— $t$ 时段火电机组 $i$ 的申报价格;

$P_{h,i,t}$ —— $t$ 时段火电机组 $i$ 的中标容量;

$C_{wp,j,t}$ —— $t$ 时段风光机组 $j$ 的申报价格;

$P_{wp,j,t}$ —— $t$ 时段风光机组 $j$ 总中标容量;

$\lambda_{c,s,t}^f$ —— $t$ 时段储能机组 $s$ 的放电价格;

$P_{c,s,t}^f$ —— $t$ 时段储能机组 $s$ 的放电容量;

$\lambda_{c,s,t}^{ch}$ —— $t$ 时段储能机组 $s$ 的充电价格;

$P_{c,s,t}^{ch}$ —— $t$ 时段储能机组 $s$ 的充电容量。

### 2.2 约束条件

火电机组爬坡和滑坡约束条件为

$$\begin{cases} P_{h,i,t} - P_{h,i,t-1} \leq P_{h,i,up} \\ P_{h,i,t-1} - P_{h,i,t} \leq P_{h,i,down} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $P_{h,i,up}$ ——火电机组 $i$ 的最大爬坡率;

$P_{h,i,down}$ ——火电机组 $i$ 的最大滑坡率。

火电机组最小连续启停时间约束条件为

$$\begin{cases} T_{h,i,t}^z - (\mu_{h,i,t-1} - \mu_{h,i,t}) T_{h,i}^{z,min} \geq 0 \\ T_{h,i,t}^1 - (\mu_{h,i,t} - \mu_{h,i,t-1}) T_{h,i}^{1,min} \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $T_{h,i,t}^z$ —— $t$ 时段火电机组 $i$ 持续运行时间;

$\mu_{h,i,t-1}$ —— $t-1$ 时段火电机组 $i$ 的启停状态;

$\mu_{h,i,t}$ —— $t$ 时段火电机组 $i$ 的启停状态;

$T_{h,i}^{z,min}$ ——火电机组 $i$ 的最小连续运行时间;

$T_{h,i,t}^1$ —— $t$ 时段火电机组 $i$ 的持续停机时间;

$T_{h,i}^{1,min}$ ——火电机组 $i$ 的最小连续停机时间。

火电机组输出功率约束条件为

$$\mu_{h,i,t} P_{h,i,t}^{min} \leq P_{h,i,t} \leq \mu_{h,i,t} P_{h,i,t}^{max} \quad (4)$$

式中: $P_{h,i,t}^{min}, P_{h,i,t}^{max}$ —— $t$ 时段火电机组 $i$ 的输出功率下限和上限。

发电企业通常采用10分段申报容量价格。

分段报价函数公式如下:

$$\begin{cases} C_{i,t} = \omega_q, P_{h,i,t}^{min} + 0.1(q-1)P_{h,i,t}^{mid} \leq P_{h,i,t} \leq \\ P_{h,i,t}^{min} + 0.1qP_{h,i,t}^{mid} \\ P_{h,i,t}^{mid} = P_{h,i,t}^{max} - P_{h,i,t}^{min} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $C_{i,t}$ —— $t$ 时段火电机组 $i$ 的分段报价;

$\omega_q$ ——火电机组对应10分段中的 $q$ 分段报价, $q=1,2,3,\dots,10$ ;

$P_{h,i,t}^{mid}$ —— $t$ 时段火电机组 $i$ 输出功率上下限的差值。

将式(5)转化为普通线性约束条件,公式如下:

$$\begin{cases} P_{h,i,t} \leq \sum_{q=1}^{10} m_q (P_{h,i,t}^{min} + 0.1qP_{h,i,t}^{mid}) \\ P_{h,i,t} \geq \sum_{q=1}^{10} m_q [P_{h,i,t}^{min} + 0.1(q-1)P_{h,i,t}^{mid}] \\ C_{i,t} = \sum_{q=1}^{10} \omega_q m_q \\ \sum_{q=1}^{10} m_q = 1 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $m_q$ ——0-1变量,取1表示处于该分段报价区间,取0表示不处于该分段报价区间。

风电机组减载水平约束条件为

$$0 \leq k_{z,t} \leq k_{z,max} \quad (7)$$

式中: $k_{z,t}$ —— $t$ 时段风电机组 $z$ 的减载水平;

$k_{z,max}$ ——风电机组的最大减载水平。

风电机组输出功率约束条件为

$$0 \leq P_{w,z,t} \leq (1 - k_{z,t}) P_{w,z,t}^N \quad (8)$$

式中: $P_{w,z,t}$ —— $t$ 时段风电机组 $z$ 的输出功率;

$P_{w,z,t}^N$ ——风电机组 $z$ 的额定功率。

储能机组充放电功率约束条件为

$$\begin{cases} P_c^{min} \leq P_{c,t} \leq P_c^{max} \\ P_f^{min} \leq P_{f,t} \leq P_f^{max} \\ P_s^{min} \leq P_{s,t} \leq P_s^{max} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $P_c^{min}, P_c^{max}$ ——储能机组充电功率的下限和上限;

$P_{c,t}$ —— $t$ 时段储能机组的充电功率;

$P_f^{min}, P_f^{max}$ ——储能机组放电功率的下限和上限;

$P_{f,t}$ —— $t$ 时段储能机组的放电功率;

$P_s^{min}, P_s^{max}$ ——储能机组 $s$ 输出功率的下限和上限;

$P_{s,t}$ —— $t$ 时段储能机组 $s$ 的输出功率。

储能机组荷电状态(State of Charge, SOC)约束条件为

$$\begin{cases} H(t) = H(t-1) - \frac{\lambda_{ch} P_{es,t}}{C_{en}} \\ H_{min} \leq H(t) \leq H_{max} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $H(t), H(t-1)$ —— $t$ 时段和 $t-1$ 时段储能机组的SOC;

$\lambda_{ch}$ ——电池充放电效率;

$P_{es,t}$ —— $t$ 时段电池充放电功率;

$C_{en}$ ——电池容量;

$H_{min}, H_{max}$ ——储能机组荷电状态的下限和上限。

为了防止电池过度充电,影响储能机组寿命,造成不必要的经济损失,一般将 $H_{max}$ 取为0.8, $H_{min}$ 取为0.2。

### 3 调频市场出清模型

#### 3.1 FAHP构建方法

为了更准确地反映各机组调频性能的优劣,采用FAHP处理风电机组输出功率的不确定性,将不确定信息转化成模糊运算函数,综合评价各机组对调频性能指标的贡献程度。FAHP由模糊综合评估方法和层次分析法结合形成,可将定量问题转化为定性和定量相结合,给出更精确的结论。FAHP的具体构建步骤可参考文献[15]。

模糊优先矩阵 $A=(a_{uv})_{n \times n}$  ( $u, v=1, 2, 3, \dots, n$ ,  $n$ 为评价指标数)满足:

$$\begin{cases} a_{uv} + a_{vu} = 1 \\ a_{uu} = 0.5 \end{cases} \quad (11)$$

式中: $a_{uv}$ ——指标 $u$ 对于指标 $v$ 的重要程度。

$a_{uv} > 0.5$ 表示指标 $u$ 的权重大于指标 $v$ 的权重, $a_{uv} < 0.5$ 表示指标 $u$ 的权重小于指标 $v$ 的权重; $a_{uv} = 0.5$ 表示两指标权重相同。

模糊一致矩阵 $B=(b_{xy})_{n \times n}$  ( $x, y=1, 2, 3, \dots, n$ )满足:

$$b_{xy} = \frac{\sum a_{uv} - \sum a_{vu}}{2n} + 0.5 \quad (12)$$

指标初始权重 $D_0$ 公式如下:

$$D_0 = \frac{1}{n} - \frac{1}{n-1} + \frac{1}{n(n-1)/2} \sum_{y=1}^n b_{xy} \quad (13)$$

对专家的评价值进行平均化处理,得到直接

影响矩阵 $\bar{S}=(\bar{s}_{xy})_{n \times n}$ ,  $\bar{s}_{xy}$ 为指标之间的相互影响关系。不同指标间的相互影响程度对应的 $\bar{s}_{xy}$ 数值如表1所示。

表1 不同指标间的相互影响程度对应的 $\bar{s}_{xy}$ 数值

指标间的相互影响程度	$\bar{s}_{xy}$
两因素相同重要	1
较弱重要	3
稍强重要	5
较强重要	7
强烈重要	9

#### 3.2 FAHP优化调频性能指标

综合调频性能指标 $K_{all}$ 公式如下:

$$K_{all} = aK_{\alpha} + bK_{\beta} + cK_{\gamma} \quad (14)$$

式中: $K_{\alpha}, K_{\beta}, K_{\gamma}$ ——调节速率、响应时间、调节精度指标;

$a, b, c$ ——权重因子,一般取 $a=b=c=\frac{1}{3}$ 。

综合调频性能指标调整公式为

$$w(K_{all}) = \begin{cases} 1, & K_{all} \geq K_{top} \\ w'(K_{all}), & K_{bott} \leq K_{all} < K_{top} \\ 0.1, & K_{all} < K_{bott} \end{cases} \quad (15)$$

$$w'(K_{all}) = 0.5 + \frac{0.5}{K_{top} - K_{bott}} \times (K_{all} - K_{bott}) \quad (16)$$

式中: $w(K_{all})$ ——优化后机组的综合调频性能指标;

$K_{top}$ ——调频市场最大准入指标,取4;

$w'(K_{all})$ ——处于最大和最小准入指标中间的调频性能指标;

$K_{bott}$ ——调频市场最小准入指标,取1。

按照各类机组参与调频的可调用容量占调频总容量的比例,设置初始可调用容量如下:火电机组可调用容量远大于风光机组,风光机组可调用容量大于储能机组。

确定权重数据后得到模糊影响矩阵 $C$ 为

$$C = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} \\ 3 & 1 & \frac{1}{3} \\ 5 & 3 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

通过调整调节精度指标在综合调频性能指标中的占比,可合理区分各类机组的调频精度差异。本文设置如下:风光机组的调节精度低于火电机

组和储能机组,其中储能机组的综合调频性能最优,火电机组次之。

各个机组的综合性能指标初始权重 $K$ 的公式如下:

$$K = \frac{1}{3} (K_{\alpha,m,r} + K_{\beta,m,r} + K_{\gamma,m,r}) \quad (18)$$

式中: $K_{\alpha,m,r}$ ——机组 $m$ 第 $r$ 次调频后的调节速率指标;

$K_{\beta,m,r}$ ——机组 $m$ 第 $r$ 次调频后的响应时间指标;

$K_{\gamma,m,r}$ ——机组 $m$ 第 $r$ 次调频后的调节精度指标。

火电机组综合性能指标优化后权重 $K_1$ 为

$$K_1 = 0.15K_{\alpha,m,r} + 0.15K_{\beta,m,r} + 0.7K_{\gamma,m,r} \quad (19)$$

风光机组综合性能指标优化后权重 $K_2$ 为

$$K_2 = 0.2K_{\alpha,m,r} + 0.2K_{\beta,m,r} + 0.6K_{\gamma,m,r} \quad (20)$$

储能机组综合性能指标优化后权重 $K_3$ 为

$$K_3 = 0.12K_{\alpha,m,r} + 0.12K_{\beta,m,r} + 0.76K_{\gamma,m,r} \quad (21)$$

### 3.3 调频动态申报价格调整

利用FAHP优化后的综合调频性能指标,对调频容量报价 $C^R$ 、调频里程报价 $C^L$ 和预估机会成本 $C^J$ 进行调整,同时依据调频需求价格排序进行边际出清。调整公式如下:

$$W^R = \frac{C^R}{w(K_{\text{all}})} \quad (22)$$

$$W^L = \frac{C^L \lambda_a}{w(K_{\text{all}})} \quad (23)$$

$$W^J = \frac{C^J}{w(K_{\text{all}})} \quad (24)$$

式中: $W^R$ ——调整后的调频容量报价;

$W^L$ ——调整后的调频里程报价;

$\lambda_a$ ——调频市场依据历史数据得到的调频里程;

$W^J$ ——调整后的预估机会成本。

考虑锂电池储能和飞轮储能的不同物理特性:锂电池储能能量密度高、寿命短,适合浅充浅放以延长寿命,可响应自动发电控制(Automatic Generation Control, AGC)调频中的低频信号;飞轮储能寿命长,但需持续供电,适合深度充放电,可响应AGC调频中的高频信号。

当储能SOC处于深度充电区、深度放电区等状态时,调频动态申报边界可参考文献[13]。两种类型储能SOC处于理想运行点之上及深度充电区以下时,调频动态申报边界为

$$P_{s,t}^{\text{offer}} = \begin{cases} P_{s,t}^{\text{up,max}} = |H_{s,t}^{\text{soc}} - H_{s,t}^{\text{soc,low}}| \frac{E_{s,\text{rate}}}{\Delta t} \\ P_{s,t}^{\text{down,max}} = |H_{s,t}^{\text{soc}} - H_{s,t}^{\text{soc,high}}| \frac{E_{s,\text{rate}}}{\Delta t} \end{cases} \quad (25)$$

$$H_{s,t}^{\text{soc,low}} \leq H_{s,t}^{\text{soc}} \leq H_{s,t}^{\text{soc,high}}$$

式中: $P_{s,t}^{\text{offer}}$ —— $t$ 时段储能机组 $s$ 的调频动态申报边界;

$P_{s,t}^{\text{up,max}}$ —— $t$ 时段储能机组 $s$ 的上调频容量申报边界;

$H_{s,t}^{\text{soc}}$ —— $t$ 时段储能机组 $s$ 的SOC;

$H_{s,t}^{\text{soc,low}}$ —— $t$ 时段储能机组 $s$ 的低位运行点;

$E_{s,\text{rate}}$ ——储能机组 $s$ 的额定容量;

$\Delta t$ ——时间间隔,取1h;

$P_{s,t}^{\text{down,max}}$ —— $t$ 时段储能机组 $s$ 的下调频容量申报边界;

$H_{s,t}^{\text{soc,high}}$ —— $t$ 时段储能机组 $s$ 的高位运行点。

### 3.4 调频市场出清目标函数和约束条件

调频市场出清是为了协调风-光-储机组及火电机组参与调频容量分配,使调频性能更优越的机组获得更多中标容量。

调频市场出清的目标函数公式如下:

$$\min F_t = \sum_i (W_{i,t}^R + W_{i,t}^L + W_{i,t}^J) P_{M,i,t} + \sum_s (W_{s,t}^R + W_{s,t}^L + W_{s,t}^J) P_{M,s,t} \quad (26)$$

式中: $F_t$ —— $t$ 时段所有机组的调频出清总成本;

$W_{i,t}^R, W_{i,t}^L, W_{i,t}^J$ —— $t$ 时段火电机组 $i$ 调整后的调频容量报价、调频里程报价和预估机会成本;

$P_{M,i,t}$ —— $t$ 时段火电机组 $i$ 的中标调频容量;

$P_{M,s,t}$ —— $t$ 时段储能机组 $s$ 的中标调频容量。

相关约束条件为

$$\begin{cases} 0 \leq P_{M,i,t} \leq P_{M,i,t}^{\text{max}} \\ 0 \leq P_{M,s,t} \leq P_{M,s,t}^{\text{max}} \\ 0 \leq P_{M,s,t} \leq P_{s,t}^{\text{offer}} \\ \sum_i P_{M,i,t} + \sum_s P_{M,s,t} \geq P_t^{\text{up}} \\ \sum_i P_{M,i,t} \lambda_a^h + \sum_s P_{M,s,t} \lambda_a^c \geq P_t^{\text{xmil}} \end{cases} \quad (27)$$

式中: $P_{M,i,t}^{\text{max}}$ —— $t$ 时段火电机组 $i$ 的最大调频中标容量;

$P_{M,s,t}^{\text{max}}$ —— $t$ 时段储能机组 $s$ 的最大调频中标容量;

$P_t^{\text{up}}$ —— $t$ 时段电网的总调频需求;

$\lambda_a^h, \lambda_a^c$ ——火电机组和储能机组的调频里程;  
 $P_t^{xmi}$ —— $t$ 时段系统的调频里程需求。

## 4 算例分析

### 4.1 仿真参数

本文基于 IEEE 30 节点系统和 IEEE 39 节点系统进行仿真分析。在 IEEE 30 节点系统中,设置 3 台火电机组(总容量为 890 MW)、2 座风电场(装机容量分别为 320、210 MW)、2 座光伏电站(容量分别为 450、750 MW)及 2 台储能机组(参数分别为 21 MW/45 MWh、25 MW/51 MWh)。其中,火电机组分别位于节点 28、30,风电机组分别位于节点 3、5,光伏机组分别位于节点 15、19,储能机组分别位于节点 16、20。

火电机组、风电机组及光伏机组参数如表 2 所示。

表 2 火电机组、风电机组及光伏机组参数

机组类型	机组编号	输出功率上限 / MW	输出功率下限 / MW	最小连续运行或停机时间 / h	调差系数	综合调频性能指标
火电机组	1	330	165	11.0	0.05	1.35
	2	220	120	9.5	0.05	1.20
	3	170	80	6.0	0.05	1.10
风电机组	1				0.06	1.80
	2				0.06	1.90
光伏机组	1				0.06	1.70
	2				0.06	1.60

节点负荷功率如图 2 所示。其中,数字 1~16 表示 16 个节点。风光机组输出功率和负荷曲线如图 3 所示。

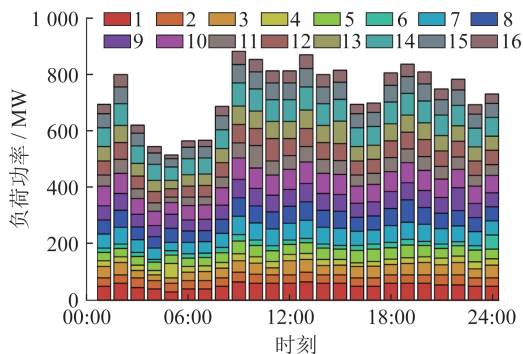


图 2 节点负荷功率

在调频市场中,3 台火电机组的调频容量报价为 12 元/MWh,调频里程报价为 17.5 元/MWh;

2 台储能机组的容量报价为 30 元/MWh,调频里程报价为 8 元/MWh。在电能市场中,不同机组统一充放电报价,充电报价为 350 元/MWh,放电报价为 750 元/MWh。

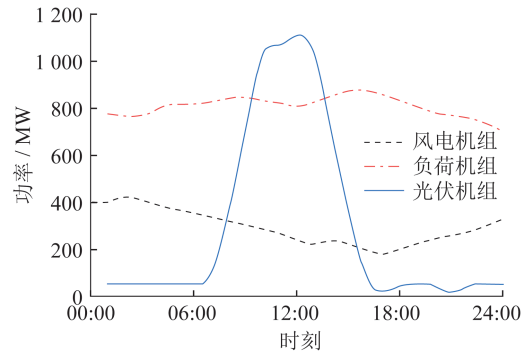


图 3 风光机组输出功率和负荷曲线

### 4.2 调频性能优化下储能机组参与联合市场收益对比

为比较储能机组参与联合出清对调频收益和频率波动的影响,本文设置 4 个场景如下:场景 1 为储能机组不参与电能量和调频市场,仅火电机组参与两类市场;场景 2 为储能机组仅参与调频市场,火电机组参与两类市场;场景 3 为风-光-储机组仅参与电能量市场,火电机组参与两类市场;场景 4 为采用本文所提出的联合出清策略,风-光-储机组和火电机组共同参与两类市场。不同场景的收益对比如表 3 所示。

表 3 不同场景的收益对比

场景	收益/万元			频率波动范围 / Hz
	电能量市场	调频市场	总计	
1	4 155.19	135.22	4 290.41	<0.28
2	4 155.19	180.22	4 335.41	<0.20
3	4 169.18	139.61	4 308.79	<0.29
4	4 166.45	189.22	4 355.67	<0.21

由表 3 可以看出,储能机组参与调频辅助服务能够有效降低系统频率波动。未配置储能机组参与调频市场时,系统频率波动范围小于 0.28 Hz;配置储能机组参与调频辅助服务后,频率波动范围降至小于 0.21 Hz。同时,储能机组中标调频市场后,可显著提升机组调频市场收益。对比场景 2 和场景 3 可知,储能仅参与调频市场的收益高于储能仅参与电能量市场的收益。这是由于储能的调频性能指标更优,能够大幅提升储能机组在调频市场的中标容量,进而提高了总收益。对比场景 3 和场景 4 可知,场景 4 中电能量市场收

益略低于场景3,但调频市场收益明显高于场景3。这是由于采用本文联合出清模型可以释放储能机组在电能量市场的中标容量,转而投入收益更大的调频市场。此外,由于火电机组参与调频市场存在低收益、高投入的特点,因此场景4中各类机组参与电能量和调频市场的总收益高于场景3。

#### 4.3 FAHP优化前后综合调频性能指标对比

为验证FAHP优化后的性能指标可以提高储能机组在调频市场的中标容量,减少火电机组在调频市场的中标容量,本文对优化综合性能指标前后的调频市场中标容量进行对比实验。优化前后调频市场中标容量对比如图4所示。其中,“上”和“下”分别表示各类机组上调频和下调频。

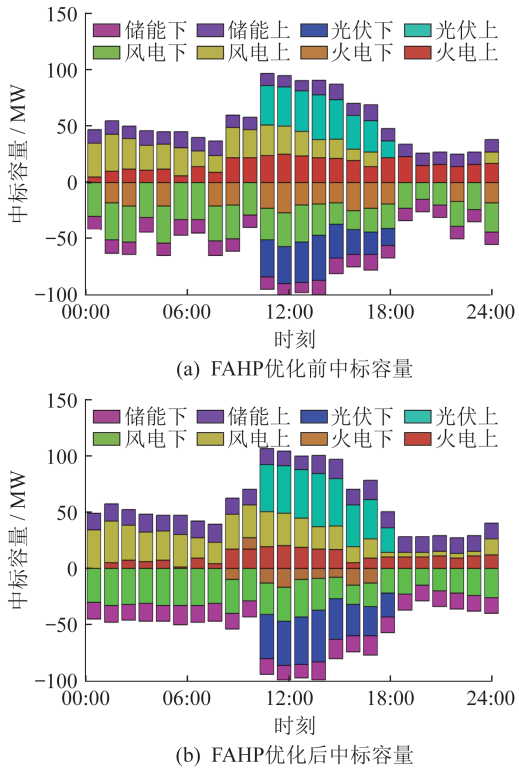


图4 FAHP优化前后调频市场中标容量对比

由图4可知,在12:00左右,光伏机组中标容量达到峰值,且波动性强于风电机组;此时,优化后的火电机组上下调频中标容量快速下降,可以更好地释放火电机组中标容量,使其参与电能量市场,而调频市场则由调频性能指标更优的储能机组参与。其中,火电机组下调频快速下降的主要原因是风电机组的减载约束,以及FAHP优化后储能机组调频性能的提升,此过程中风电机组和储能机组的调频中标容量大幅提升。优化后的

调频性能指标有助于火电机组调频容量完全出清,这是由于优化前火电机组部分中标容量受限于较差的调频性能,无法完全释放,优化后该部分中标容量可转移至电能量市场参与出清。

由于电化学储能的调节精度、调节速率及响应时间均优于火电机组,其参与调频辅助服务时更容易中标,且调节精度指标尤为突出。因此,在FAHP优化综合调频性能指标权重时,储能机组的调节精度权重高于风光机组和火电机组。此外,储能机组参与调频市场的出清成本低于未配置储能机组的场景,且储能机组的加入可有效平抑系统的频率波动幅值。FAHP优化后的调频性能指标权重有助于提高风-光-储机组在调频市场的中标容量,从而释放火电机组在调频市场的中标容量,使其转而参与电能量市场以获取收益。

#### 4.4 调频容量动态申报的联合出清对比

电能量市场的节点边际电价和调频市场的出清价格如图5所示。

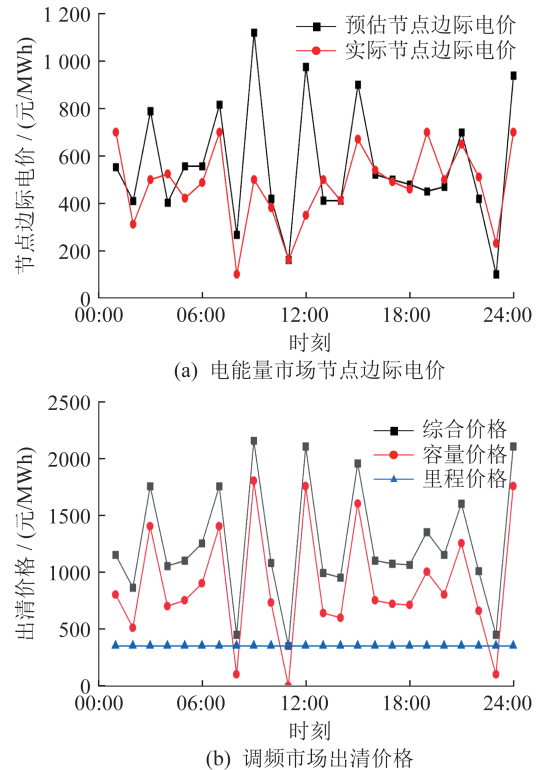


图5 电能量市场的节点边际电价和调频市场的出清价格

由图5可以看出,调频市场的出清价格变化趋势与电能量市场的预估节点边际电价一致,其原因是机会成本对电能量市场与调频市场的关联

作用。当电能量市场出清价格较高时,机组容量反而更多地参与调频市场,表明此时参与调频市场的收益高于参与电能量市场的收益。如图5中09:00时,电能量市场的预估节点边际电价约为1 100元/MWh,而调频市场出清综合价格已超过2 000元/MWh。这一结果验证了调频容量动态申报的可行性。

IEEE 30节点系统在两种模型下的出清成本如表4所示。其中:模型1为“调频性能优化+常规固定调频容量申报”的联合出清;模型2为本文提出的“调频性能优化+调频容量动态申报”的联合出清。

表4 IEEE 30节点系统在两种模型下的出清成本

模型	出清成本		
	电能量出清成本	调频出清成本	联合出清成本
1	16.118	24.346	41.464
2	16.562	22.614	41.176

由表4可以看出,模型1的电能量出清成本低于模型2,但模型2的调频出清成本明显低于模型1。这是由于模型2中储能机组更多地参与调频市场,导致电能量出清成本升高、调频出清成本降低。这一结果验证了本文所提出的在FAHP优化调节精度权重指标下,储能机组调频容量动态申报的联合出清模型能够促使储能机组依据节点边际电价和价格排序更倾向参与调频市场,能够使更多调频性能指标优越的储能机组参与调频辅助服务,从而降低了联合出清成本。

#### 4.5 IEEE 39节点系统仿真分析

为了进一步验证本文所提模型的普遍适用性和有效性,采用改进的IEEE 39节点系统对其开展数据分析。该系统包含5台火电机组(总容量为1 050 MW)、4座风电场(装机容量分别为315.5、135.5、100、200 MW)、3座光伏电站(容量分别为400、450、550 MW)及4台储能机组(参数分别为20 MW/50 MWh、22 MW/48 MWh、17 MW/46 MWh、23 MW/51 MWh)。其中,火电机组分别位于节点30、33、34、35、39,风电机组分别位于节点4、5,光伏机组分别位于节点15、16,储能机组分别位于节点2、7、17、22。

IEEE 39节点系统在两种模型下的出清成本如表5所示。

表5 IEEE 39节点系统在两种模型下的出清成本

模型	出清成本		
	电能量出清成本	调频出清成本	联合出清成本
1	18.223	35.124	54.347
2	19.874	30.356	52.230

由表5可以看出,IEEE 39节点系统的仿真结果与IEEE 30节点系统相似。这充分验证了本文所提模型在不同规模系统中的实用性。

IEEE 39节点系统中风光机组容量占比较高,可作为高渗透率新能源接入场景与IEEE 30节点系统的低渗透率新能源接入场景进行对比。FAHP优化后IEEE 39节点系统中各机组调频市场中标容量如图6所示。

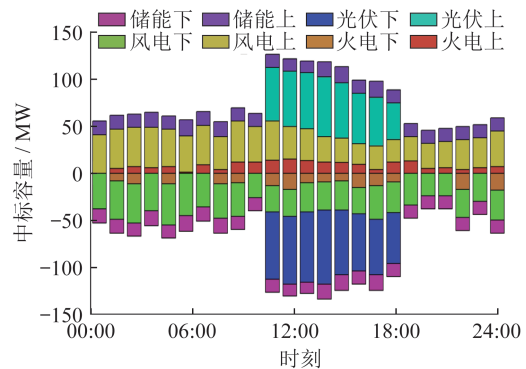


图6 FAHP优化后IEEE 39节点系统中各机组调频市场中标容量

对比图4(b)和图6可知,高比例新能源接入后,调频需求有所上升;风光机组参与调频市场降低了火电机组中标容量在调频总需求中的占比,且此时风光机组上下调频中标容量与其调频特性相符。在光伏机组发电量大的中午时段,其调频中标容量与图3中光伏机组输出功率曲线变化一致,减少了弃光现象;同时,在风电机组发电量较多的00:00—11:00时段,降低火电机组中标容量,减少了弃风现象。此外,储能机组的调频性能指标较优,在高渗透率新能源接入场景下,储能机组可进一步提升新能源消纳水平,同时通过参与调频市场获取收益。

#### 4.6 考虑多类型储能机组参与联合出清的差异性对比

在IEEE 39节点系统中,将节点17、22接入的锂电池储能机组替换为飞轮储能机组,其SOC限制在10%~90%。锂电池储能机组容量报价不变,

飞轮储能机组容量报价为15元/MWh。两种模型下不同类型储能的SOC变化曲线如图7所示。

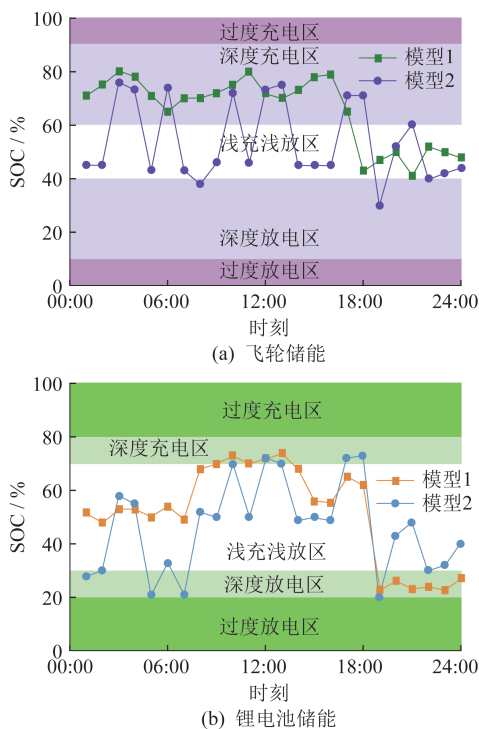


图7 两种模型下不同类型储能的SOC变化曲线

由图7可以看出,相较于模型1,在本文提出的联合出清模型下,两种储能机组更大概率处于浅充浅放区;同时,两种储能机组的SOC曲线波动幅度更大,可以提供更多的调频里程服务。

## 5 结 论

本文采用FAHP优化综合调频性能指标,针对不同机组的调频性能差异分配权重,同时构建了风-光-储机组参与调频容量动态申报的联合出清模型。通过算例分析,得出以下结论。

(1) 储能机组参与调频市场出清的收益高于其不参与调频市场出清的收益。采用本文所提联合出清模型的收益高于储能机组仅参与电能量市场的收益。此外,储能机组参与调频市场可以降低系统频率波动,更好地消纳风光机组的不确定性功率输出,有效提升风光机组在电能量和调频市场的优化配置水平。

(2) 经FAHP优化后的调频性能指标可以提高储能机组参与调频市场的中标容量,释放火电机组的调频容量,进而提高调频市场收益。同时,FAHP能够更准确地反映各机组的调频差异,使调频性能更优的机组更易中标。

(3) 储能机组容量动态申报的联合出清模型可以降低调频市场出清成本,且对电能量市场出清成本影响较小,最终降低联合出清成本。

## 参考文献:

- [1] 刘政,雷少锋,王清亮,等. 考虑备用共享的区域电力现货市场出清模型[J]. 电力建设,2021,42(11):63-71.
- [2] 陈静鹏,张鸿轩,张勇,等. 面向区域调频辅助服务市场的南方电网统一调频控制区设计与策略优化[J]. 电网技术,2022,46(7):2657-2664.
- [3] 谢敏,韦薇,李建钊,等. 储能电站参与能量-调频市场联合调度模式研究[J]. 电力建设,2019,40(2):20-28.
- [4] 任景,周鑫,程松,等. 源荷双边参与的高比例新能源电力系统能量与备用市场联合出清方法[J]. 电力建设,2023,44(1):30-38.
- [5] 尚静怡,姜欣,肖东亮,等. 基于边际成本比较型竞价模式的电力现货市场机制设计[J]. 电力系统自动化,2024,48(9):67-74.
- [6] 赵海岭,王维庆,李笑竹,等. 计及储能参与的电能-调频-备用市场日前联合交易决策模型[J]. 电网技术,2023,47(11):4575-4584.
- [7] 代江,朱思霖,田年杰,等. 基于储能灵活能量状态的现货电能量-辅助服务市场联合出清机制[J]. 南方电网技术,2024,18(1):58-68.
- [8] 栾天,杨争林,李继红,等. 适应电化学储能成本特性的电力市场机制设计[J]. 电力系统自动化,2024,48(4):101-110.
- [9] 肖云鹏,张兰,张轩,等. 包含独立储能的现货电能量与调频辅助服务市场出清协调机制[J]. 中国电机工程学报,2020,40(增刊1):167-180.
- [10] 赵晋泉,孙中昊,杨余华,等. 分布式光伏参与调频辅助服务交易机制研究[J]. 全球能源互联网,2020,3(5):477-486.
- [11] 王傲儿,赵书强,宋金历,等. 考虑新能源与储能参与调频的联合市场出清模型[J]. 太阳能学报,2024,45(3):367-376.
- [12] 刘军,李凌阳,吴梦凯,等. 分布式抽水蓄能电站与新能源发电联合参与现货市场的两阶段优化运行策略[J]. 浙江电力,2023,42(2):50-58.
- [13] 李佳承,翟文娟,窦迅,等. 计及多类型储能调频容量动态申报的电能量与调频市场联合出清方法研究[J]. 电网技术,2024,48(7):2833-2841.
- [14] VASUDEVAN K R, RAMACHANDARAMURTHY V K, VENUGOPAL G, et al. Hierarchical frequency control framework for a remote microgrid with pico hydel energy storage and wind turbine [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 127: 106666.
- [15] 刘汶瑜,陈中,杜璞良,等. 基于联盟博弈的多虚拟电厂参与日前电力市场竞标模型[J]. 电力自动化设备,2024,44(5):135-142.

(责任编辑 白林雪)