

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2021.09.006

# 风储联合参与电能量与快速调频市场的优化 投标策略

Optimization bidding strategy for wind power and energy storage participating in  
energy market

刘林鹏<sup>1</sup>, 陈嘉俊<sup>1</sup>, 朱建全<sup>1\*</sup>, 胡文霞<sup>2</sup>, 罗涛<sup>2</sup>

LIU Linpeng<sup>1</sup>, CHEN Jiajun<sup>1</sup>, ZHU Jianquan<sup>1\*</sup>, HU Wenxia<sup>2</sup>, LUO Tao<sup>2</sup>

(1. 华南理工大学 电力学院, 广州 510641; 2. 国网温州供电公司, 浙江 温州 325000)

(1. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 2. State Grid Power Supply Company, Wenzhou 325000, China)

**摘 要:**“双碳”目标下需要构建以新能源为主体的新型电力系统, 针对风储联合参与电能量与快速调频市场的优化投标问题, 提出了一种基于近似动态规划的风储联合优化投标策略。首先, 在最大化风储收益的基础上, 考虑了风电的随机性和储能系统的寿命损耗特性, 建立风储联合参与电能量与快速调频市场的优化投标模型; 其次, 为处理风储联合参与电能量与快速调频市场投标模型的非凸性和随机性, 采用近似动态规划将原问题分成多个子问题, 逐一求解后得到原问题的近似最优解; 最后, 将所提方法用于广东电力市场和宾夕法尼亚州-新泽西州-马里兰州(PJM)的快速调频市场, 所得结果证明了其有效性。

**关键词:** 风电; 储能; 近似动态规划; 快速调频; 投标策略; 风储联合; 可再生能源; 新型电力系统; 碳中和

**中图分类号:** TK 02

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-1951(2021)09-0046-08

**Abstract:** To solve the problems in the bidding of wind power and energy storage in energy market and fast frequency modulation market, a coordinated optimization bidding strategy for wind power and energy storage based on approximate dynamic programming is proposed. Firstly, to maximize the income, the optimization bidding model for wind power and energy storage participating in energy market and fast frequency modulation that has taken the randomness of wind power and life degradation of energy storage into consideration is established. Secondly, to deal with the non-convexity and randomness of the bidding model, the approximate optimal solution of the original problem is obtained after being divided into multiple sub-problems by approximate dynamic programming and solved individually. Finally, the proposed method is applied to the power market in Guangzhou and the fast frequency modulation market in Maryland, New Jersey, Pennsylvania (PJM), and its effectiveness has been proven.

**Keywords:** wind power; energy storage; approximate dynamic programming; fast frequency modulation; bidding strategy; hybrid of wind power and energy storage; renewable energy; new electric power system; carbon neutrality

## 0 引言

“双碳”目标下需要构建以新能源为主体的新型电力系统, 随着大规模可再生能源在电网中的广泛接入, 其发电随机性、间歇性、波动性将给电网安全运行带来严峻的挑战。储能可起到平抑波动、削

峰填谷、提高供电可靠性和供电效率等作用, 将在未来的电网中发挥关键作用<sup>[1-4]</sup>。

在电力市场环境中, 如何制定优化投标策略是未来储能商业化运营面临的一大问题。文献[5]研究了储能系统装设在负荷侧参与能量批发市场的多时段优化模型; 文献[6-8]建立了储能系统与新能源机组联合参与电力市场的模型并分析其经济性; 文献[9-10]研究了储能系统作为独立个体参与电力市场的最优投标问题, 考虑了储能系统的寿命模型, 并采用近似的方法解决了模型的复杂性; 文献[10]研究了云储能这一商业运营模式的经济可

收稿日期: 2021-05-18; 修回日期: 2021-06-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51977081); 广东自然科学基金项目(2018A0303131001, 2019A151501087); 中央高校基本科研业务费资助项目(2019MS020); 电力系统国家重点实验室资助课题(SKLD20M15)

行性。在上述文献中,调频市场一般采用的调频信号是经过低通滤波后得到的低频信号,本质上属于慢调频。在利用储能系统响应低频信号时,可能会出现长时间维持单向出力,使储能系统寿命出现严重损耗。此外,电化学储能等储能资源具有毫秒级甚至更短的响应速度,利用响应低频调频指令,将无法充分发挥储能的优势。

在求解方法方面,为解决储能系统寿命带来的多逻辑运算难题,部分学者将原问题的数学模型进行简化。文献[6]采用了对储能系统寿命和决策变量的关系进行多项式拟合的方法;文献[9]采用了根据调频信号的极值点来固定储能的荷电状态(State of Charge, SOC)曲线极值点的近似方法;文献[11-13]将风储联合投标问题转换成混合整数线性规划问题;文献[14-15]将风储联合投标问题转换成线性规划问题。这类方法对原问题的数学模型进行简化,虽然降低了原问题的求解难度,但是难以保证近似解的质量。另一方面,一些学者通过启发式算法求解该问题。文献[16-18]采用粒子群算法来求解非凸、非线性的风储联合投标问题。类似地,文献[19-20]采用遗传算法求解该问题。这类启发式算法通常存在求解时间长,收敛困难的问题。

针对上述问题,本文提出了一种风储联合参与电能量与快速调频市场的优化投标策略。首先,考虑到风电的随机性和储能系统的寿命损耗特性,构建了风储联合参与电能量与快速调频市场的优化投标模型。随后,利用近似动态规划将风储联合参与电能量与快速调频市场的优化投标问题解耦成多个单时段优化问题,在不改变原问题的数学模型的情况下降低了问题的复杂度。本文所提方法对风储联合参与电能量与快速调频市场的投标具有指导意义。

## 1 快速调频基本原理

### 1.1 常规调频

由于电力系统中传统机组的响应速率有限,要求其完全消除偏差是不可能的。因此常规的自动发电控制(Automatic Generation Control, AGC)系统对原始区域控制误差(Area Control Error, ACE)信号进行了低频滤波,分离出与发电机组响应速率相匹配的变化分量,即常规调频信号。

考虑到传统机组响应AGC指令的时间为数十秒,但储能资源响应的时间在毫秒级甚至更短,采用传统的AGC指令分配方式不能体现储能调频的优势。此外,储能响应低频的AGC指令会导致其长

时间维持单方向出力,将耗尽其中存储的电能量且增加寿命损耗。

### 1.2 快速调频

为充分发挥各调频资源的优势,可将原始的ACE信号分解为分钟级的低频分量和秒级的高频分量,分别分配给传统机组与储能资源,如图1所示。

储能系统采用快速调频信号作为调频指令,对提高调频控制的效果,提升电网的频率质量与合理利用储能资源均有益处。

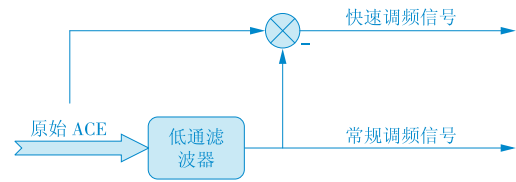


图1 快速调频信号获取方式

Fig. 1 Fast frequency modulation signal acquisition

## 2 风储参与快速调频的优化投标模型

风储参与快速调频的优化投标模型即储能系统联合新能源风电机组联合参与电能量市场和快速调频市场的优化投标模型。

假设该风储联合主体作为市场的价格接受者,所有投标均被接纳,且在实时运行时完全跟踪调频指令。决策变量包括能量市场和调频市场投标、风电和储能系统能量输出功率基点,分别用 $b_t^{\text{eng}}$ ,  $b_t^{\text{reg}}$ ,  $P_{s,t}^{\text{wind}}$ ,  $P_{s,t}^{\text{bat}}$ 表示。

### 2.1 目标函数

该最优投标模型是一个利润期望最大化模型,采用场景法处理风力预测和电价预测的不确定性,目标函数为

$$\max I = \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^{24} p_{s,t}^{\text{eng}} b_t^{\text{eng}} - \frac{n_{s,t}^{\text{eq}}}{N^{\text{fail}}} C_{\text{invest}} + (p_{s,t}^{\text{reg, mil}} R_t^{\text{mil}} K_t^{\text{perf}} + p_{s,t}^{\text{eng}} - C_0) b_t^{\text{reg}}, \quad (1)$$

式中: $I$ 为总利润的期望值; $b_t^{\text{eng}}$ 为风储主体第 $t$ 个时段能量市场的日前投标量; $p_{s,t}^{\text{eng}}$ 为第 $s$ 个场景第 $t$ 个时段的出清节点电价; $n_{s,t}^{\text{eq}}$ 为一段时间内的储能寿命损耗; $N^{\text{fail}}$ 为储能系统的失效周期数; $C_{\text{invest}}$ 为储能系统建设成本; $p_{s,t}^{\text{reg, mil}}$ 为第 $s$ 个场景第 $t$ 个时段调频市场的调频里程出清价格; $R_t^{\text{mil}}$ 为第 $t$ 个时段机组单位调频容量的调频里程,即机组在每个信号周期前后出力差的绝对值之和; $K_t^{\text{perf}}$ 为第 $t$ 个时段机组综合调频性能指标的平均值,不同市场机制下它的计算方式也不同; $C_0$ 为发电单元的核定成本; $b_t^{\text{reg}}$ 为第 $t$ 个时段风储主体投标的调频容量。

## 2.2 约束条件

(1) 风电和储能的输出功率约束为

$$0 \leq P_{s,t}^{\text{wind}} \leq W_{s,t}^{\text{wind}}, \quad (2)$$

$$-P_{\max}^{\text{bat}} \leq P_{s,t}^{\text{bat}} \leq P_{\max}^{\text{bat}}, \quad (3)$$

式中:  $P_{s,t}^{\text{wind}}$  和  $P_{s,t}^{\text{bat}}$  分别为第  $s$  个场景第  $t$  个时段的风电和储能系统的输出功率;  $W_{s,t}^{\text{wind}}$  和  $P_{\max}^{\text{bat}}$  分别为第  $s$  个场景第  $t$  个时段的最大风能和储能的额定放电功率。

(2) 能量市场投标量约束为

$$P_{s,t}^{\text{wind}} + P_{s,t}^{\text{bat}} = b_{s,t}^{\text{eng}}, \quad (4)$$

(3) 风电预留参与快速调频功率约束为

$$P_{s,t}^{\text{wind, reg-up}} = \min(W_{s,t}^{\text{wind}} - P_{s,t}^{\text{wind}}, \delta_{\text{ramp}}^{\text{wind}} P_{\max}^{\text{wind}}), \quad (5)$$

$$P_{s,t}^{\text{wind, reg-dn}} = \min(P_{s,t}^{\text{wind}} - 0, \delta_{\text{ramp}}^{\text{wind}} P_{\max}^{\text{wind}}), \quad (6)$$

式中:  $\delta_{\text{ramp}}^{\text{wind}}$  为风电的爬坡率;  $P_{s,t}^{\text{wind, reg-up}}$  和  $P_{s,t}^{\text{wind, reg-dn}}$  分别为第  $s$  个场景第  $t$  个时段的风电为调频预留的上调功率和下调功率。

(4) 储能系统预留参与快速调频功率约束为

$$P_{s,t}^{\text{bat, reg-up}} = P_{\max}^{\text{bat}} - P_{s,t}^{\text{bat}}, \quad (7)$$

$$P_{s,t}^{\text{bat, reg-dn}} = P_{s,t}^{\text{bat}} - (-P_{\max}^{\text{bat}}), \quad (8)$$

$$P_{s,t}^{\text{bat, reg-up}} + P_{s,t}^{\text{wind, reg-up}} \geq b_t^{\text{reg}}, \quad (9)$$

$$P_{s,t}^{\text{bat, reg-dn}} + P_{s,t}^{\text{wind, reg-dn}} \geq b_t^{\text{reg}}, \quad (10)$$

$$P_{s,t}^{\text{bat, reg-up}} \geq \beta \cdot b_t^{\text{reg}}, \quad (11)$$

$$P_{s,t}^{\text{bat, reg-dn}} \geq \beta \cdot b_t^{\text{reg}}, \quad (12)$$

式中:  $P_{s,t}^{\text{bat, reg-up}}$  和  $P_{s,t}^{\text{bat, reg-dn}}$  分别为第  $s$  个场景第  $t$  个时段储能系统为调频预留的上调功率和下调功率;  $\beta$  为调频预留功率比例。

(5) 储能系统参与快速调频输出功率约束为

$$P_{s,k}^{\text{bat, reg}} = \begin{cases} b_t^{\text{reg}} S_k^{\text{reg}} - P_{s,t}^{\text{wind, reg-up}} + e_k & b_t^{\text{reg}} S_k^{\text{reg}} > P_{s,t}^{\text{wind, reg-up}} \\ b_t^{\text{reg}} S_k^{\text{reg}} + P_{s,t}^{\text{wind, reg-dn}} + e_k & b_t^{\text{reg}} S_k^{\text{reg}} < -P_{s,t}^{\text{wind, reg-dn}} \\ e_k & \text{其他} \end{cases}, \quad (13)$$

式中:  $P_{s,k}^{\text{bat, reg}}$  为第  $s$  个场景储能系统在第  $k$  个快速调频信号周期用于调频的输出功率;  $e_k$  为第  $k$  个快速调频信号周期的风电误差, 假设其服从正态分布且期望值与风电系统提供调频输出的额外功率成正比;  $S_k^{\text{reg}}$  为第  $k$  个快速调频信号周期的调频需求的标么值, 在数值上等于调频需求与出清的调频容量之比。

(6) 储能系统在第  $k$  个快速调频信号周期的充放电功率约束为

$$P_{s,k}^{\text{bat, d}} = \max(P_{s,k}^{\text{bat, reg}} + P_{s,t}^{\text{bat}}, 0), \quad (14)$$

$$P_{s,k}^{\text{bat, c}} = \max(-P_{s,k}^{\text{bat, reg}} - P_{s,t}^{\text{bat}}, 0), \quad (15)$$

式中:  $P_{s,k}^{\text{bat, c}}$  和  $P_{s,k}^{\text{bat, d}}$  分别为第  $s$  个场景的储能系统在第  $k$  个调频信号周期的充电和放电功率。

(7) 储能荷电状态转移约束为

$$\Delta E_{s,k} = \eta P_{s,k}^{\text{bat, c}} \Delta k - \frac{1}{\eta} P_{s,k}^{\text{bat, d}} \Delta k, \quad (16)$$

$$E_{s,k+1} = (1 - \alpha) E_{s,k} + \Delta E_{s,k}, \quad (17)$$

式中:  $\Delta E_{s,k}$  为第  $s$  个场景储能系统在第  $k$  个调频信号周期的荷电状态变化量;  $\eta$  为储能系统的充放电效率;  $\Delta k$  为调频信号周期;  $E_{s,k}$  为第  $s$  个场景储能系统在第  $k$  个调频信号周期的荷电状态;  $\alpha$  为储能系统的自放电率。

## 2.3 不同市场机制下调频性能指标 $K$ 的计算方法

(1) 广东调频市场调频性能指标  $K$  的计算方法<sup>[21]</sup>为

$$k_1 = \frac{v_t}{v_{\text{av}}}, \quad (18)$$

$$k_2 = 1 - \frac{\delta}{300}, \quad (19)$$

$$k_3 = 1 - \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_0}, \quad (20)$$

$$K = \frac{2k_1 + k_2 + k_3}{4}, \quad (21)$$

式中:  $k_1, k_2, k_3$  分别为调节速率、响应时间、调节精度 3 个指标;  $v_t$  为发电单元实测速率;  $v_{\text{av}}$  为 AGC 发电单元平均调节速率;  $\delta$  为发电单元响应延长时间;  $\varepsilon_t$  为发电单元调节误差;  $\varepsilon_0$  为发电单元调节允许误差。

(2) 宾夕法尼亚州-新泽西州-马里兰州 (PJM) 调频市场调频性能指标  $K$  的计算方法<sup>[22]</sup>为

$$k_1 = 1 - \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{R_t - S_t}{V} \right|, \quad (22)$$

$$k_2 = \max_{\delta} \frac{\sum_{t=1}^n R_t + \delta S_t}{\sqrt{\sum_{t=1}^n R_t^2 + \delta \sum_{t=1}^n S_t^2}}, \quad (23)$$

$$k_3 = \left| 1 - \frac{\delta}{300} \right|, \quad (24)$$

$$K = \frac{k_1 + k_2 + k_3}{3}, \quad (25)$$

式中:  $k_1, k_2, k_3$  分别为精确度、相关度、延迟度 3 个指标;  $R_t, S_t$  分别为第  $t$  个调频信号所在时刻的发电单元出力值与调频信号要求的出力值;  $V$  为该调频周期内的调频信号平均绝对值;  $n$  为调频信号频率, 取  $n=900$ 。

## 3 基于近似动态规划的投标策略

风储联合参与电能量与快速调频市场的投标模型中含有较多逻辑判断过程, 无法直接采用商业求解器直接求解。若转化为混合整数非线性规划问题将引入大量逻辑变量, 导致求解困难。因此,

本文将模型的投标过程描述成马尔科夫决策过程,并使用近似动态规划法求解马尔科夫决策过程的最优策略,使其在任意初始状态下都能获得最大的值函数,得到全局最优的目标函数值<sup>[23-24]</sup>。

### 3.1 基本元素定义

马尔科夫决策过程由一个四元组构成  $M = (S, A, P(s'|s, a), R(s'|s, a))$ 。分别为状态集  $S$ , 有  $s_t \in S$ ,  $s_t$  表示第  $t$  个时段的系统状态; 策略集  $A$ , 有  $a_t \in A$ ,  $a_t$  表示第  $t$  个时段采取的策略; 状态转移概率  $P(s'|s, a)$ , 表示在状态  $s$  采取策略  $a$  后到达其他状态  $s'$  的概率分布情况; 回报函数  $R(s'|s, a)$ , 表示在状态  $s$  采取策略  $a$  并到达状态  $s'$  的过程中得到的回报。

### 3.2 投标过程

在运行日前一天, 投标主体需根据风电的出力 and 市场价格预测数据, 在电能量市场和调频市场确定 24 h 的能量和调频容量投标, 同时确定储能系统在 24 h 内的输出功率基点。

(1) 状态变量: 根据上文, 投标过程的状态变量  $S_t$  定义为在运行日 24 h 储能系统的荷电状态  $E_t$ , 即

$$S_t = \{E_t\}。 \quad (26)$$

(2) 决策变量: 定义以上变量为决策变量, 即

$$A_t = \{b_t^{\text{eng}}, b_t^{\text{reg}}, P_t^{\text{wind}}, P_t^{\text{bat}}\}。 \quad (27)$$

(3) 外部信息: 定义能量市场与调频市场在 24 h 的出清价格和 24 个时段的平均风力为外部信息  $W_t$ 。外部信息为随机变量,  $W_t$  在系统到达时刻  $t$  时才可确定下来, 即

$$W_t = \{p_t^{\text{eng}}, p_t^{\text{reg}}, W_t^{\text{wind}}\}。 \quad (28)$$

(4) 状态转移函数:  $S_{t+1} = T(S_t, a_t, W_t)$  给出在已知外部信息  $W_t$  时, 在状态  $S_t$  做出决策  $a_t$  后到达的下一状态  $S_{t+1}$ 。若当前荷电状态与投标决策确定, 则下一时刻的荷电状态可唯一确定, 即

$$E_{t+1} = E_t + \Delta E_t。 \quad (29)$$

(5) 值函数: 在策略  $\pi$  下, 状态  $S_t$  对应的值函数  $V_t^\pi$  定义为从该状态出发直到第 24 个时段的总日前利润期望, 具体为能量市场、调频市场收益之和减去等效储能寿命折损成本, 即

$$V_t^\pi(S_t) = E \left[ \sum_{i=t}^T R_i \right], \quad (30)$$

式中:  $T=t+23$ 。

### 3.3 基于近似动态规划的求解算法

近似动态规划可以避免传统动态规划的“维数灾难”问题, 是一种公认的性能较为强大的优化算法<sup>[14]</sup>。该方法将多阶段问题拆分成多个单阶段子问题, 自后往前地求解子问题并记录其解, 最后组合子问题的解形成原问题的解。

对于值函数, 可以拆分为以下称为贝尔曼方程的形式, 即

$$V_t^\pi(S_t) = E \left[ \sum_{i=t}^T R_i \middle| S_t \right] = \sum_{S_{t+1} \in S} P(S_{t+1}|S_t, \pi(S_t)) [R_t + V_{t+1}^\pi(S_{t+1})]。 \quad (31)$$

记最优策略  $\pi^*$  对应的最优状态值函数为  $V^*$ , 其满足贝尔曼最优性方程, 即

$$V_t^*(S_t) = \max_{a_t} E [R(S_t, a_t) + V_{t+1}^*(S_{t+1}) | S_t] = \max_{a_t} \sum_{S_{t+1} \in S} P(S_{t+1}|S_t, a_t) [R(S_t, a_t) + V_{t+1}^*(S_{t+1})]。 \quad (32)$$

原模型中, 大部分变量为无法完全遍历的连续变量, 但这些变量均有上下限。使用表格法, 第 1 步是将模型中的连续变量离散化。定义  $\delta_v$  为连续变量  $v$  的网格化粒度;  $v_{\max}, v_{\min}$  为该变量的上下限。该变量的离散段数  $M_v$  可以计算为

$$M_v = \left\lceil \frac{v_{\max} - v_{\min}}{\delta_v} + 1 \right\rceil。 \quad (33)$$

表格为值函数的离散化近似, 若变量的网格化粒度足够大, 即可无限逼近实际最优解, 但考虑到计算负担随粒度线性增长, 离散化粒度应通过试验取适中值。本文的状态变量仅有储能系统 SOC 的值  $E_t$ , 因此表格的大小为  $M_v \times (T+1)$ , 也即系统的所有状态数。通过网格化, 模型的状态与决策均为可数, 对于 24 个时段的单阶段问题, 可以通过遍历当前状态  $S_t$  下的可行策略  $a_t$ , 通过式 (32) 求得  $V_t^*$ 。同时, 在本文中, 若当前状态  $S_t$  和采取的策略  $a_t$  相同, 则下一时段的状态  $S_t$  和过程的回报函数  $R(S_t, a_t)$  可唯一确定。为了避免重复运算, 可设置备忘录, 将计算得到的回报函数的值储存到其中, 在下次计算同一动作的时候直接查表, 减少求解时间<sup>[25]</sup>。

## 4 算例分析

在本文算例中, 场景设置为 50 MW 的风电场, 内部加装 6 MW/36 MW·h 的铅碳储能系统, 以发电机组的角色联合参与广东现货能量市场与调频市场。采用某一风电场的典型日风力发电数据, 如图 2 所示。在典型日发电曲线上叠加随机误差, 令该误差  $\sigma$  服从均值为 0、标准差为 5% 正态分布, 即  $\sigma \sim N(0, 0.05^2)$ , 随机生成 500 组场景用于仿真分析。储能数据来自广东某储能示范工程的储能参数, 具体数据见表 1。

本文基于 2019 年 8 月 15 日广东 AGC 系统数据, 生成了广东的调频信号基本场景。同时, 为引入

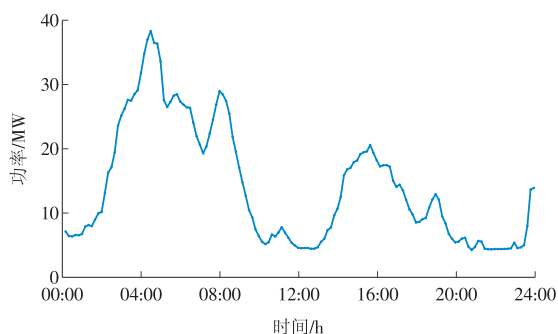


图2 典型日风力发电数据

Fig. 2 Wind power generation data of a typical day

表1 储能参数

Tab. 1 Parameters of energy storage

| 参数 | $P_{\max}^{\text{bat}}/\text{MW}$ | $E_{\max}^{\text{bat}}/(\text{MW}\cdot\text{h})$ | $\eta$ | $\alpha$ | $N^{\text{fail}}$ | $C_{\text{invest}}/\text{万元}$ |
|----|-----------------------------------|--------------------------------------------------|--------|----------|-------------------|-------------------------------|
| 值  | 6                                 | 36                                               | 0.9    | 0        | 1 500             | 6 480                         |

PJM的快速调频品种,基于PJM的历史调频信号,生成了对应的调频信号场景。2种调频信号在1 h内的场景如图3所示,信号每2 s一个点,共1 800个。快速调频信号的小时平均调频里程为15.215 8 MW,约为常规调频信号的3倍。风电的爬坡率 $\delta_{\text{ramp}}^{\text{wind}}$ 设为30%。风电参与调频的调节误差 $e_k$ 的方差设置为 $0.1^2$ 。为了保证提供调频的高精确度,储能的调频预留功率比例 $\beta$ 设为0.2。节点电价和调频里程价格的预测值如图4所示。

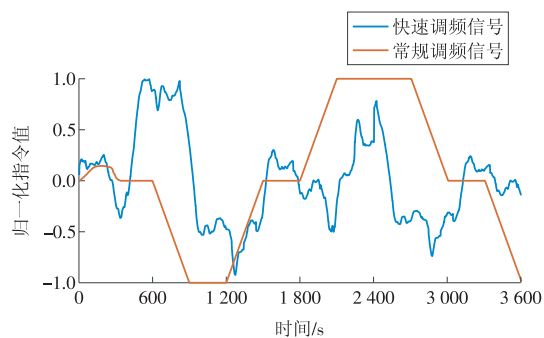


图3 调频信号

Fig. 3 Frequency modulation signal

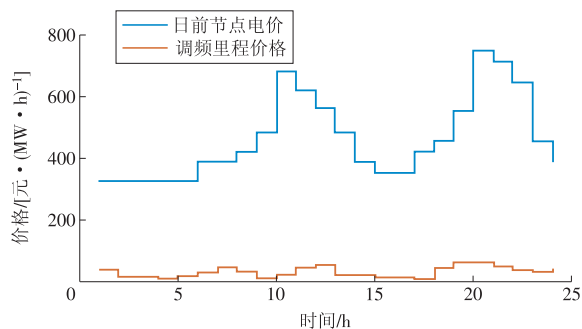


图4 预测电价

Fig. 4 Forecasted electricity price

#### 4.1 基于近似动态规划的优化投标结果

利用近似动态规划对风储参与电能量与快速

调频市场的投标模型进行求解,得到预测场景下的投标决策结果如图5所示,储能系统的荷电状态变化情况如图6所示。可以看出,为了保留应对实时调频的功率预留以维持较高的调频性能指标,储能系统和风电系统的能量基准点随可用风能的变化而波动。而且,风储联合主体在大部分时段都倾向于投标尽量多的调频容量以获得更大收益。此外,储能系统的能量基准在能量价格较低时是负的,因为其需要补偿储能系统在跟踪快速调频信号时损失的电量,以维持一定的荷电状态。

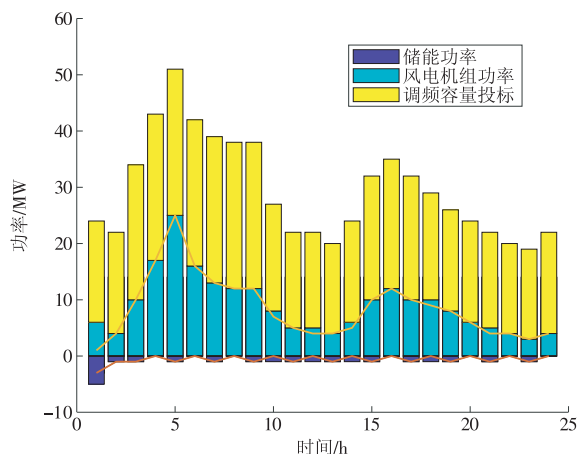


图5 风储参与电能量与快速调频市场的投标结果

Fig. 5 Bidding results of wind power and energy storage participating in energy market and fast frequency modulation market

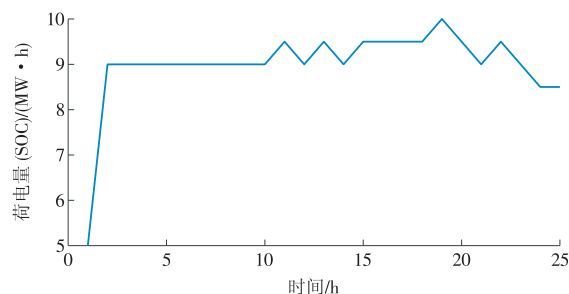


图6 储能系统的荷电状态变化情况

Fig. 6 Variation of the SOC of energy storage

#### 4.2 风储参与快速调频与常规调频的对比

为了提高储能系统的盈利能力,并减少对其他市场主体的影响,需要选择合适的调频信号品种。快速调频是PJM调频市场中的细分品种,相对于另一个细分品种常规调频,其调频指令变化速度幅度更大,对机组的响应速度、爬坡速率等性能要求更高,快速调频的调频里程约为常规调频的3倍。表2对比了采用快速调频和常规调频情况下风储联合主体的收益情况。可以看出,风储联合参与快速调频的收益相较于常规调频有明显提升,这一方面得益于快速调频信号的调频里程较高,约为常规调频

的 3 倍,因此调频里程补偿也是参与常规调频品种的 3 倍。另一方面,在快速调频信号下,储能系统的充放电深度下降,从而储能系统的等效寿命折损也随之减少,减少了约 0.6 次的循环次数。在这 2 个因素影响下,快速调频品种相对于常规调频品种,使储能系统的收益增加了 4.6 万元,约 70.87%。同时,在该运行策略下,储能系统的日收益为 282 388.950 2 元,储能系统的等效日充放电次数约为 0.994 6,等效寿命折损对应的建设成本损失为 27 353.267 0 元,按最大充放电次数 1 500 与年运行日 365 d 计算,储能系统共可运行 11.017 6 a。

4.3 不同市场调频评价方法的对比

由于调度机构发放的调频信号不会总为最大值 1,大部分时间其在一个更小的范围内波动,如  $[-0.6, 0.8]$ 。设计的算例中,市场允许发电机组夸大自身的调频能力,投标更高的调频容量,在其能够跟踪调频信号时完全跟踪,而在无法跟踪时按储能功率的上限或下限出力,最后按广东、PJM 规则计

表 2 不同调频品种结果对比

Tab. 2 Comparison of different frequency modulations

| 项目          | 快速调频 RegD     | 常规调频 RegA     |
|-------------|---------------|---------------|
| 日收益/元       | 282 388.950 2 | 165 264.454 9 |
| 日前能量收益/元    | 36 377.407 6  | 28 528.073 8  |
| 调频容量补偿/元    | 148 850.379 7 | 141 107.217 6 |
| 调频里程补偿/元    | 124 514.430 0 | 39 978.020 9  |
| 平均调频性能指标    | 0.950 0       | 0.950 0       |
| 储能系统寿命成本/元  | 27 353.267 0  | 44 348.857 4  |
| 储能系统等效日循环/次 | 0.994 6       | 1.612 6       |
| 储能系统运行年限/a  | 11.017 6      | 6.795 4       |

算每 15 min 时段内的调频指标,以算出该时段调频补偿作为比较。查看优化结果,比较不同规则下,哪个规则会导致更少的调频能力夸大,即对机组的投机投标行为有更好的约束力。夸大系数为模型中控制主体投标投机的比例,系数的值越大,主体越倾向于投机行为。仿真得到的数据见表 3,表中广东、PJM 代表不同指标计算规则。

表 3 不同市场调频性能指标的效益对比

Tab. 3 Benefits of frequency modulation performance indicators in different markets

| 项目          | 夸大系数 1.25     |               | 夸大系数 1.10     |               | 夸大系数 1.00     |
|-------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|             | 广东            | PJM           | 广东            | PJM           | 广东、PJM        |
| 日总收益/元      | 454 568.086 2 | 449 007.762 8 | 447 786.138 1 | 447 619.115 4 | 429 337.389 0 |
| 能量市场收益/元    | 32 174.678 0  | 33 952.616 5  | 33 730.283 6  | 33 952.616 5  | 35 652.622 8  |
| 调频容量收益/元    | 276 625.570 0 | 272 395.873 3 | 271 677.810 1 | 271 269.222 9 | 255 929.790 9 |
| 调频里程收益/元    | 226 165.807 0 | 222 863.849 4 | 222 360.959 7 | 222 105.828 8 | 209 386.144 2 |
| 平均调频性能指标    | 0.934 8       | 0.943 4       | 0.948 8       | 0.946 2       | 0.950 0       |
| 储能系统运行成本/元  | 80 397.968 8  | 80 204.576 3  | 79 982.915 2  | 79 708.552 7  | 71 631.168 8  |
| 储能系统等效日循环/次 | 2.923 5       | 2.916 5       | 2.908 46      | 2.898 4       | 2.604 7       |
| 储能系统运行年限/a  | 3.748 4       | 3.757 5       | 3.767 9       | 3.780 8       | 4.207 2       |

对比广东或 PJM 的调频指标计算规则下的算例仿真结果,结论如下:若主体夸大自身调频容量,在广东或 PJM,其收益均将增加;而在广东的收益增加更明显。即总体上 PJM 的性能指标较为严格。在调频资源过量夸大调频投标而在跟踪调频指令出现偏差时,使用 PJM 计算方法的性能指标  $K$  值较广东规则小,且夸大情况越严重,性能指标值的差越大,说明 PJM 的算法有利于抑制投机行为。但在各主体不投机投标的前提下,采用不同的性能指标计算方法对其收益影响很小,可以忽略不计。

5 结论

本文提出了一种风储联合参与电能量与快速调频市场的优化投标策略,得到的主要结论如下。

(1)本文所提方法可以同时处理风电的随机性以及储能模型的非凸性,提供了近似最优的投标

策略。

(2)快速调频相较于常规调频,能为风储主体提供更高的收益。

(3)将所提的方法在广东电力市场和 PJM 进行示范应用,所得结果说明了所提方法具有良好的应用效果和推广应用价值。

参考文献:

[1]谢丽蓉,郑浩,魏成伟,等.兼顾补偿预测误差和平抑波动的光伏混合储能协调控制策略[J].电力系统自动化,2021,45(3):130-138.

XIE Lirong, ZHENG Hao, WEI Chengwei, et al. Coordinated control strategy of photovoltaic hybrid energy storage considering prediction error compensation and fluctuation suppression [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(3): 130-138.

- [2]王晗雯,鲁胜,周照宇.光伏-混合储能微电网协调控制及经济性分析[J].华电技术,2020,42(4):31-36.  
WANG Hanwen, LU Sheng, ZHOU Zhaoyu. Coordinated control and economic analysis on a PV-hybrid energy storage micro-grid system[J].Huadian Technology, 2020, 42(4): 31-36.
- [3]王育飞,郑云平,薛花,等.基于增强烟花算法的移动式储能削峰填谷优化调度[J].电力系统自动化,2021,45(5):48-56.  
WANG Yufei, ZHENG Yunping, XUE Hua, et al. Optimal dispatch of mobile energy storage for peak load shifting based on enhanced firework algorithm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(5):48-56.
- [4]吕刚.能源互联网背景下的储能应用模式研究[D].北京:华北电力大学,2019.
- [5]KHANI H, VARMA R K, ZADEH M R D, et al. A real-time multistep optimization-based model for scheduling of storage-based large - scale electricity consumers in a wholesale market[J].IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(2):836-845.
- [6]HE G N, CHEN Q X, KANG C Q, et al. Cooperation of wind power and battery storage to provide frequency regulation in power markets [J]. IEEE Transactions on Power System, 2017, 32(5):3559-3568.
- [7]DING H J, PINSON P, HU Z C, et al. Integrated bidding and operating strategies for wind - storage systems [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(1):163-172.
- [8]HE G N, CHEN Q X, KANG C Q, et al. Optimal offering strategy for concentrating solar power plants in joint energy, reserve and regulation markets [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(3):1245-1254.
- [9]HE G N, CHEN Q X, KANG C Q, et al. Optimal bidding strategy of battery storage in power markets considering performance - based regulation and battery cycle life [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(5):2359-2367.
- [10]KAZEMI M, ZAREIPOUR H. Long - term scheduling of battery storage systems in energy and regulation markets considering battery's lifespan [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6):6840-6849.
- [11]伍俊,鲁宗相,乔颖,等.考虑储能动态充放电效率特性的风储电站运行优化[J].电力系统自动化,2018,42(11):41-47,101.  
WU Jun, LU Zongxiang, QIAO Ying, et al. Optimal operation of wind farm with hybrid storage devices considering efficiency characteristics of dynamic charging and discharging[J].Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(11):41-47, 101.
- [12]冯力勇,张云.考虑电池能效的电网侧电化学储能电站最优功率控制策略研究[J].华电技术,2020,42(4):37-41.  
FENG Liyong, ZHANG Yun. Optimal power control strategy of grid - side electrochemical energy storage stations considering battery energy efficiency [J]. Huadian Technology, 2020, 42(4):37-41.
- [13]胡泽春,夏睿,吴林林,等.考虑储能参与调频的风储联合运行优化策略[J].电网技术,2016,40(8):2251-2257.  
HU Zechun, XIA Rui, WU Linlin, et al. Joint operation optimization of wind - storage union with energy storage participating frequency regulation [J]. Power System Technology, 2016, 40(8):2251-2257.
- [14]HE G N, CHEN Q X, KANG C Q, et al. Optimal bidding strategy of battery storage in power markets considering performance - based regulation and battery cycle life [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(5):2359-2367.
- [15]HE G N, CHEN Q X, KANG C Q, et al. Cooperation of wind power and battery storage to provide frequency regulation in power markets[J].IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5):3559-3568.
- [16]沈玉明,胡博,谢开贵,等.计及储能寿命损耗的孤立微电网最优经济运行[J].电网技术,2014,38(9):2371-2378.  
SHEN Yuming, HU Bo, XIE Kaigui, et al. Optimal economic operation of isolated microgrid considering battery life loss [J]. Power System Technology, 2014, 38(9):2371-2378.
- [17]朱青,曾利华,寇凤海,等.考虑储能并网运营模式的工业园区风光燃储优化配置方法研究[J].电力系统保护与控制,2019,47(17):23-31.  
ZHU Qing, ZENG Lihua, KOU Fenghai, et al. Research on optimal allocation method of wind, photovoltaic, gas turbine and energy storage in industrial parks considering energy storage's grid-connected operation modes [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(17):23-31.
- [18]刘金豆,成杰,俞高伟.基于低压直流配电网并网的并离网一体光储发电系统研究[J].华电技术,2021,43(4):63-70.  
LIU Jindou, CHENG Jie, YU Gaowei. Research on a PV - energy storage system with integration of grid - connection and disconnection modes based on low - pressure DC distribution network [J]. Huadian Technology, 2021, 43(4):63-70.
- [19]GOLSHANNAVAZ S, AFSHARNIA S, AMINIFAR F. Smart distribution grid: Optimal day-ahead scheduling with reconfigurable topology [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(5):2402-2411.
- [20]ZHAO B, ZHANG X S, CHEN J, et al. Operation optimization of standalone microgrids considering lifetime characteristics of battery energy storage system [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(4):934-943.
- [21]南方能源监管局,广东省经济和信息化委,广东省发展

- 改革委.广东电力市场交易基本规则(试行):南方监能市场[2017]20号[EB/OL].(2017-01-19)[2021-06-30].  
<http://nfj.nea.gov.cn/adminContent/initViewContent.do?pk=402881e55992395f0159b57e91820035>.
- [22]PJM. PJM manual 12: Balancing operations [EB/OL]. (2016-08-07)[2021-06-30].<http://www.pjm.com/media/documents/manuals/m12.ashx>.
- [23]王浩浩,陈嘉俊,朱涛,等.计及储能寿命与调频性能的风储联合投标模型及算法[J].电网技术,2021,45(1): 208-217.
- WANG Haohao, CHEN Jiajun, ZHU Tao, et al. Joint bidding model and algorithm of wind-storage system considering energy storage life and frequency regulation performance [J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 208-217.
- [24]朱涛,陈嘉俊,段秦刚,等.基于近似动态规划的工业园区源-网-荷-储联合运行在线优化算法[J].电网技术, 2020, 44(10): 3744-3752.
- ZHU Tao, CHEN Jiajun, DUAN Qingang, et al. Approximate dynamic programming-based online algorithm for combination operation of source-network-load-storage in the industrial park [J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 3744-3752.
- [25]帅航.基于近似动态规划(ADP)的微电网日内在线优化运行方法研究[D].武汉:华中科技大学,2019.
- (本文责编:张帆)

#### 作者简介:

刘林鹏(1996—),男,江西赣州人,在读硕士研究生,从事人工智能在电力系统及电力市场应用等方面的研究(E-mail:1105918403@qq.com)。

朱建全\*(1982—),男(壮族),广西博白人,副教授,博士,从事电力系统建模、分析与优化及电力市场等方面的研究(E-mail:zhujianquan@scut.edu.cn)。

\*\*\*\*\*

### “能源物联网下的电力系统需求侧负荷调控技术”专刊征稿启事

随着碳达峰、碳中和“3060”目标的提出,充分利用光伏、风电等新能源替代化石能源,减少碳排放,已成为我国经济进入高质量发展的内在要求和必然趋势。可以预见,含高比例新能源的电力系统将很快成为现实。然而,新能源发电受天气影响波动较大,具有高度不确定性,以火电为代表的大量传统机组频繁启停、爬坡,运行能效低、排放高。为消纳波动的新能源,维持电力供给侧和需求侧的实时平衡,正在兴起的5G和物联网技术赋予了需求侧海量负荷的实时监测和调控能力,提供了维持电网平衡的新途径。可通过灵活调整储能电池、电动汽车、空调等负荷资源的用电,在保证用户生活生产需求的前提下,为电网提供调峰、调频、备用等服务。随着新能源的增加和传统机组的减少,挖掘需求侧海量负荷的调节潜能是实现新能源高效清洁消纳、维持电网安全经济运行的有效途径。

为此,《华电技术》特推出“能源物联网下的电力系统需求侧负荷调控技术”专刊,邀请澳门大学智慧城市物联网国家重点实验室惠红勋博士、澳门大学智慧城市物联网国家重点实验室张洪财助理教授、浙江大学电气工程学院丁一教授担任特约主编,共同探讨需求侧负荷调控领域发展的前沿成果、最新进展、关键技术及未来发展方向,欢迎业内同仁踊跃投稿。

#### 一、征稿范围(包括但不限于)

- (1)负荷资源的建模与调节能力评估方法。
- (2)大规模负荷资源的控制与优化方法。
- (3)基于5G和能源物联网的负荷控制技术。
- (4)基于数据驱动和数字孪生的负荷控制技术。
- (5)多能源形态的负荷资源协同控制技术。
- (6)极端事件下提升系统弹性的负荷调控技术。
- (7)负荷资源的低碳用能建模与量化评估技术。
- (8)负荷资源参与电力市场、碳排放市场的机制设计。

#### 二、时间进度

专刊拟于2021年11月15日截稿,2022年3期(3月25日)后择期出版。

#### 三、征稿要求

- (1)专刊只收录未公开发表的论文,拒绝一稿多投。作者对论文内容的真实性和客观性负责。
- (2)按照《华电技术》论文格式要求使用Word软件排版,论文模板请在网站([www.hdpower.net](http://www.hdpower.net))首页“作者中心”下载。
- (3)请保留论文图片、曲线和表格原始文件,并在投稿时按规定提交。
- (4)论文作者应遵守相关学术不端规定。

#### 四、投稿方式

- (1)在线投稿(推荐):登录在线采编系统([www.hdpower.net](http://www.hdpower.net)),完成在线全文投稿,欢迎投稿时推荐审稿人。
- (2)邮箱投稿:hongxunhui@um.edu.mo(惠博士);hdjs-chd@vip.163.com(编辑部)。
- (3)咨询联系:刘芳 0371-58501060 13838002988;杨满成 010-63918755 13801175292。