

# 高耗能工业负荷调控灵活性量化及需求响应报价策略

陈朝艺<sup>1</sup>, 杨永标<sup>1</sup>, 徐青山<sup>1</sup>, 庄 重<sup>2</sup>

(1. 东南大学 电气工程学院, 南京 210096; 2. 国网江苏省电力有限公司 营销服务中心, 南京 210019)

**摘要:**针对高耗能工业用户负荷调节潜力多元化、差异化显著的特点,为实现其参与多品种需求响应市场的精准投标,提出一种负荷调控灵活性量化评价方法及跨时间参与需求响应报价的策略。首先,构建基于序关系分析法-熵权法-利用优劣解距离法(technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)法的多时间尺度负荷调控灵活性评估指标体系,量化负荷调控灵活性差异;其次,设计了计及负荷调控灵活性的跨时间负荷资源与多类型需求响应品种的动态匹配机制,建立需求响应总收益最大化的跨时间报价模型;最后,采用粒子群算法求解某工业用户在参与约定需求响应(agreed demand response, ADR)、快速避峰响应(fast peak avoidance response, FPAR)、实时需求响应(real-time demand response, RDR)时的最优功率分配预案与报价组合,算例表明该策略可使用户参与各类型需求响应的总收益均达到最大。

**关键词:**高耗能工业用户;调控灵活性;G1-熵权-TOPSIS法;需求响应市场;报价策略

## Quantification of flexibility in high energy-consuming industrial load control and demand response pricing strategy

CHEN Chaoyi<sup>1</sup>, YANG Yongbiao<sup>1</sup>, XU Qingshan<sup>1</sup>, ZHUANG Zhong<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Marketing Service Center, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210019, China)

**Abstract:** In view of the diversification and significant differentiation of load regulation potential of high-energy-consuming industrial users, in order to realize accurate bidding in the multivariety demand response market, a quantitative evaluation method considering the flexibility of load regulation and a strategy of cross-time participation in demand response quotation are proposed. Firstly, a multi-time scale load control flexibility evaluation index system based on the order relation analysis method-entropy weight method-TOPSIS is constructed to quantify the difference in load control flexibility. Secondly, a dynamic matching mechanism between cross-time load resources and multiple types of demand response varieties considering the flexibility of load regulation is proposed, and a cross-time quotation model considering the maximization of total revenue of demand response is established. Finally, the PSO algorithm is used to solve the optimal power allocation plan and quotation combination of an industrial user when participating in the agreed demand response (ADR), fast peak avoidance response (FPAR) and real-time demand response (RDR), and the case study shows that the strategy can maximize the total benefit of the user's participation in various types of demand response.

**Key words:** high-energy-consuming industrial users; regulatory flexibility; G1-entropy-weight-TOPSIS method; demand response market; quotation strategy

## 0 引言

在“双碳”目标驱动的新型电力系统建设中,高耗能工业用户作为需求侧灵活性资源的重要载体<sup>[1]</sup>,其负荷调控能力对平抑新能源波动、保障电网安全具有关键作用。然而,当前工业负荷灵活性资源的调控面临两大挑战:一方面,负荷调控灵活性

量化缺乏多时间尺度耦合评估体系<sup>[2]</sup>,导致资源价值难以精准画像;另一方面,高耗能工业用户参与多类型需求响应市场时,内部异构负荷资源因静态与动态特性差异难以实现多交易品种协同优化<sup>[3]</sup>,制约用户收益最大化。

负荷调控灵活性评估是在电网与负荷互动的过程中重要的一个分支,在其他研究中又称可调节能力、响应潜力评估等。文献[4]基于及自适应循环神经网络空调负荷预测模型,提出了一种负荷需求响应潜力评估策略。文献[5]建立面向调节能力表征的聚合模型体系。文献[6]结合电力检修、轮

收稿日期:2025-12-15;修回日期:2026-01-30

基金项目:国家电网有限公司科技项目资助(5400-2024-18217A-1-1-ZN)

体调荷等业务场景,融合用户静态属性与动态特征,构建负荷调控价值的多维度评价体系。文献[7]构建了温控负荷集群的等效聚合模型,提出响应随机性量化方法,实现其调节潜力分布特性的统计评估。缺乏对负荷动态响应特性研究以及多时间尺度的分级评价标准,难以满足新型电力系统对工业负荷跨时间协同响应的技术要求。

用户侧或者负荷聚合商在参与需求响应的过程中,可以综合内部灵活性资源的可调潜力以及不同地区的需求响应市场补贴信息,对报价情况进行优化调整,以追求利益最大化<sup>[8-10]</sup>。文献[8]设计电动汽车聚合商参与需求响应的双重定价机制,建立净收益最大化模型。文献[9]提出了工业园区多能互补需求响应市场机制,借鉴两部制电价思路设计用户间互动响应模型,建立集中式与分布式协同的优化架构。既有研究集中于单一需求响应品种下的定价策略优化<sup>[11,15]</sup>未考虑高耗能工业用户需同时参与多类型需求响应市场的协同需求,忽略了内部负荷多时间尺度灵活性的本质差异,阻碍了工业用户灵活性资源在多品种需求响应市场的价值释放。

基于上述分析,本文通过构建“时间尺度解耦评价-资源分组匹配机制”,实现负荷调控灵活性与需求响应市场规则的深度衔接。本文主要贡献在于:

(1) 构建“日前-日内-实时”多时间尺度调控灵活性评估指标体系,通过序关系分析法(order relation analysis method, G1)与熵权法对指标进行主客观赋权,利用优劣解距离法(technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)对高耗能工业负荷多时间尺度灵活性进行量化打分;

(2) 提出“可调负荷分组-响应品种匹配-需求响应报价决策”优化框架,实现高耗能工业负荷内部差异化可调资源与多类型需求响应市场的精准适配,并利用粒子群算法求解工业用户在参与不同需求响应市场时的最优功率分配预案与报价组合。

## 1 高耗能工业用户负荷调控灵活性评估指标体系构建

### 1.1 负荷调控灵活性评估指标

对于高耗能工业负荷参与电网调控中的负荷随时间变化情况,可用图1的曲线概括说明,该曲线直观体现了高耗能工业负荷的调控灵活性特征。

此外,在“双碳”目标的驱动下,考虑高耗能工业负荷的单位碳排放量可量化其环保效益,可调节频次则体现负荷短时多次调整的可行性,这两个指标

进一步拓展了灵活性评估维度。

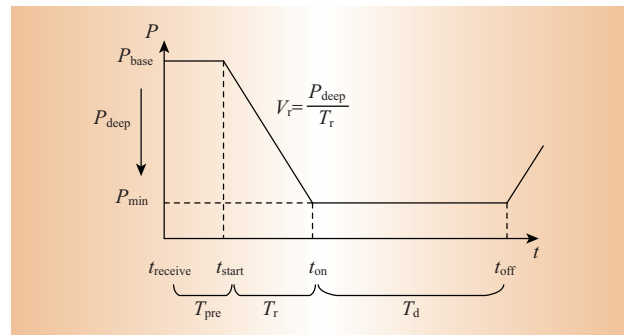


图1 工业负荷响应功率-时间曲线

Fig. 1 Industrial load response power-time curve

以下给出这些指标的具体计算公式。

(1) 可调节深度:工业用户参与响应前的负荷与调控过程中的实际负荷之差,用以表征负荷固有的物理响应能力,即

$$P_{\text{deep}} = P_{\text{base}} - P_{\text{min}} \quad (1)$$

式中:  $P_{\text{deep}}$  为用户参与响应前的功率值, kW;  $P_{\text{min}}$  为负荷调控过程的实际功率, kW。

(2) 响应准备时间:它包括了从接收指令到实际执行响应措施的所有准备活动所需时间,即

$$T_{\text{pre}} = t_{\text{start}} - t_{\text{receive}} \quad (2)$$

式中:  $t_{\text{start}}$  和  $t_{\text{receive}}$  分别为负荷开始响应和接到响应信号的时间。

(3) 响应持续时间:指完全达到调节要求后,能保持该状态的最长时间,即

$$T_{\text{d}} = t_{\text{off}} - t_{\text{on}} \quad (3)$$

式中:  $t_{\text{off}}$  为工业负荷响应结束的时间,  $t_{\text{on}}$  为工业负荷刚开始达到响应要求的时间。

(4) 响应速率:工业负荷在参与调控过程中的响应速率可定义为单位时间内功率变化量,表征响应的快慢程度,即

$$V_r = \frac{P_{\text{init}} - P_{\text{goal}}}{t_{\text{goal}} - t_{\text{start}}} \quad (4)$$

式中:  $V_r$  为工业负荷的响应速率, kW/min;  $t_{\text{goal}}$  为调控过程工业负荷功率爬坡到目标功率的时间;  $t_{\text{start}}$  为工业负荷开始响应指令时间;  $P_{\text{goal}}$  为工业负荷参与响应的目标功率, kW;  $P_{\text{init}}$  为工业负荷参与响应前的功率, kW。

(5) 碳排放因子:高耗能工业负荷的生产设备在每消耗单位电量所产生的碳排放量(kg/kWh)。该指标考虑了碳排因素,直接关联负荷在调控过程中对减排的贡献程度,即

$$CEP = \frac{C_q \alpha_c}{W_e} \quad (5)$$

式中： $C_q$  为高耗能工业负荷在一个调控周期内煤炭、天然气等现场燃烧的化石能源用量，kg 或  $m^3$ ； $\alpha_q$  为燃料碳排放因子，根据政府间气候变化专门委员会标准或实测值确定， $kgCO_2/kg$  燃料或  $kgCO_2/m^3$  燃料； $W_q$  为总用电量，kWh。

(6) 可调节频次：该指标考虑了因快速频繁调整导致的设备磨损，可用于表征设备在短时间内多次调节的安全性。本文取一天内最高调节次数作为可调节频次。该数据由设备物理特性（如热惯性、机械恢复周期）和生产工艺稳定性共同决定，可由设备安全员或者专家评估得到。

## 1.2 日前-日内-实时调控灵活性评价体系

如图2所示，在提取了高耗能工业负荷的典型响应特征指标后，根据不同时间尺度进行分级，日前调控侧重总量规划，对日前调控灵活性评估的指标主要有可调节深度、响应准备时间、响应持续时间、碳排放因子等；在此基础上，日内调控强化短时支撑，对负荷的响应速率指标有一定的要求，而实时调控细化动态频控，可能在较短时间内（分钟级甚至秒级）对同一负荷进行多次调控，对设备的可调节频次有严格的要求，因此将其纳入实时调控的评估指标中。

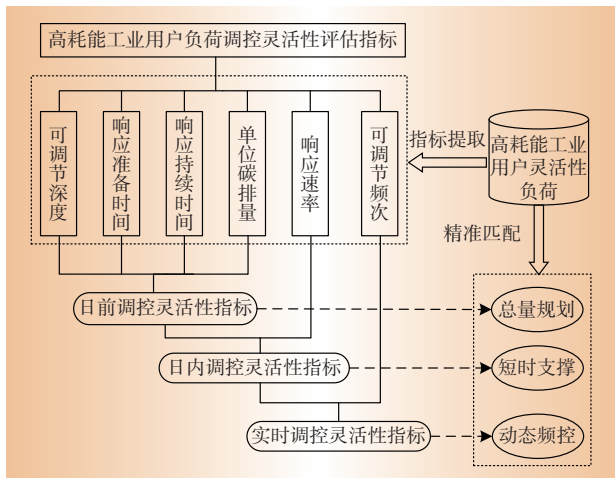


图2 高耗能工业用户调控灵活性评价体系

Fig. 2 Evaluation system for the regulation and control flexibility of high-energy-consuming industrial users

## 2 高耗能工业用户负荷调控灵活性量化模型

如图3所示，通过第1节建立的调控灵活性评估体系，从日前-日内-实时等3个时间尺度分别选取合适的评估指标，利用熵权法和序关系分析法得到各指标的客观权重和主观权重，接着采用组合赋权法得到其综合权重，最后通过TOPSIS法可以得出各个高耗能工业负荷在不同时间尺度下的调控灵活性评估得分。

性评估得分。

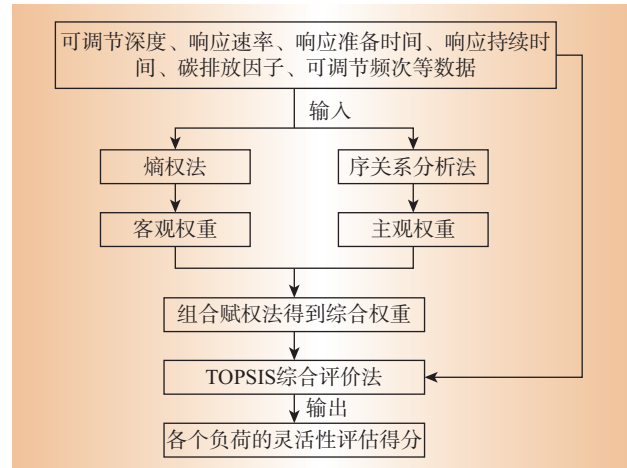


图3 高耗能工业负荷调控灵活性量化流程

Fig. 3 Flow of the quantification of the flexibility of high-energy-consuming industrial load control

### 2.1 基于主客观权重偏离度最小化的组合赋权法

在高耗能工业负荷调控灵活性量化问题中，各个评价指标的客观权重通过熵权法确定，主观权重由G1法确定，相对于传统的层次分析法，其优势在于由序关系链驱动的无矩阵决策机制，通过专家对指标重要性排序的定性判断直接生成权重，不需要进行一致性检验，操作更加简便。

为了在调控灵活性评估中兼顾决策的主观性和负荷响应数据的客观性，本文采用基于主客观权重偏离度最小化的组合赋权法<sup>[12]</sup>。组合权重的计算公式为

$$w_p = \alpha w_p^1 + \beta w_p^2 \quad (6)$$

式中： $\alpha$  和  $\beta$  分别为主观权重和客观权重的分配系数； $w_p^1$  为序关系分析法计算出的指标  $p$  的主观权重； $w_p^2$  为熵权法计算出的指标  $p$  的客观权重。

负荷  $q$  的主客观加权属性值的偏离程度可表示为

$$D_q = \sum_{p=1}^n (\alpha w_p^1 x_{pq} - \beta w_p^2 x_{pq})^2 \quad (7)$$

由此可建立主客观权重偏离度  $H$  最小化的组合赋权法模型为

$$\min H = \sum_{q=1}^m \sum_{p=1}^n (\alpha w_p^1 x_{pq} - \beta w_p^2 x_{pq})^2 \quad (8)$$

通过求解该模型，可以得到主客观权重偏离度最小化的分配系数  $\alpha$ 、 $\beta$ ，以及最终的组合权重  $w_p$ 。

### 2.2 基于TOPSIS综合评价法的调控灵活性量化方法

采用G1-熵权法与TOPSIS法结合的优势在于，前者可以更加科学地计算评估指标的主客观权重，避免了仅采用TOPSIS法决策导致的权重选择困难。



### 3 灵活性负荷跨时间参与需求响应市场报价策略

本文前一部分量化了高耗能工业负荷在不同时间尺度下的调控灵活性,然而不同的需求响应市场对用户的提前通知时间有所区别,这就依赖于负荷的响应准备时间与提前通知时间的关系来对可调负荷进一步分组,以匹配多品种交易的需求;另一方面,高耗能工业用户在参与市场需求响应时,可结合具体的响应类型及补贴规则,基于负荷多时间尺度灵活性的不同,将负荷分组报价,使得自身收益最大化。以江苏省为例,用户可通过参与约定需求响应(日前通知)、快速避峰响应(日内通知)、实时需求响应(提前通知时间<0.5 h)来实现负荷削减并获得响应补贴<sup>[13]</sup>。

#### 3.1 灵活性负荷跨时间参与多类型需求响应适配机制

根据2.2节的计算结果可以得到高耗能工业用户可调负荷的日前、日内、实时调控灵活性得分,此时会出现两种情况:① 负荷的3个时间尺度得分差异比较大,调控组别划分较为明显。② 负荷的3个时间尺度得分相近,说明该负荷可以参与日前、日内、实时尺度的调控,此时需要根据负荷的响应准备时间与提前通知时间的大小关系对负荷进行“二次筛选”分组(如图4所示),为了量化得分差异是否明显,本文引入相对离散指标 $V_s$ 来计算,即

$$V_s = \frac{s}{d} \quad (9)$$

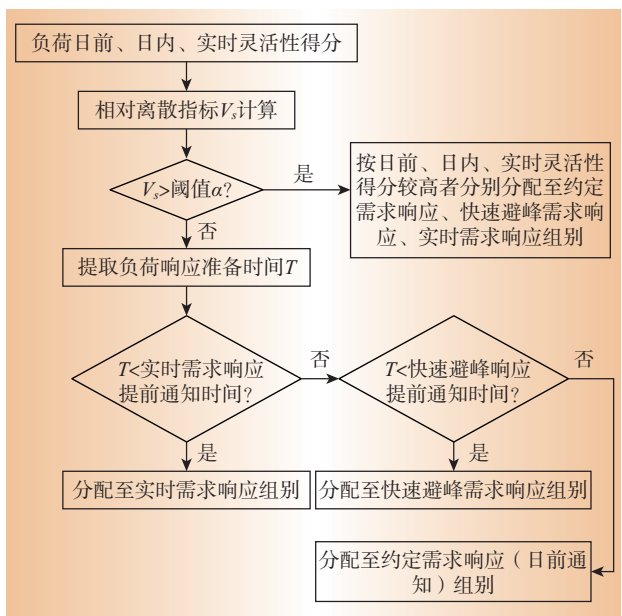


图4 灵活性负荷跨时间参与多类型需求响应流程

Fig. 4 Flow of flexibility loads participating in multiple types of demand response across time

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 (d_i - d)^2}{3}} \quad (10)$$

式中: $d_i(i=1,2,3)$ 为负荷的日前、日内、实时调控灵活性得分; $s$ 为3个时间尺度得分的总体标准差; $d$ 为3个时间尺度得分的平均值。相对离散指标 $V_s$ 越大,代表得分之间的离散程度越大,数据差异性明显,本文设置阈值 $\alpha$ 作为判断负荷是否需要进一步“二次筛选”分组的依据, $\alpha$ 取所有负荷相对离散指标的平均值,用以衡量负荷灵活性得分相对离散指标差异的平均水平。

(1)  $V_s > \alpha$  的负荷,按照得分较高者划分至对应需求响应组别。

(2)  $V_s \leq \alpha$  的负荷,需“二次筛选”分组。由于需求响应补贴金额由高到低一般是实时需求响应、快速避峰响应、约定需求响应,因此为了实现用户收益最大化,可根据负荷响应准备时间与提前通知时间的大小关系依次划分至相应组别(如图4所示)。

#### 3.2 高耗能工业用户需求响应收益最大化模型

根据江苏省需求响应用户补贴规则(如表1所示),不同需求响应类型的响应速度系数以及度电补贴标准不同,对于实时需求响应而言,还有额外的容量补贴(10元/kW)。因此需要建立高耗能工业用户需求响应收益最大化模型求解其报价报量方案,用户的收益主要分为需求响应补贴 $B_{res,i}$ 、通过削减负荷节省的用电费用 $C_{res,i}$ 两部分,其负荷响应成本 $C_{res,i}$ 采用文献[10]中的模型,可表示为负荷削减量的二次函数形式。

表1 江苏省需求响应补贴规则

Table 1 Jiangsu province demand response subsidy rules

| 需求响应类别 | 提前通知时间  | 响应速度系数 | 限价/(元·kWh <sup>-1</sup> ) |
|--------|---------|--------|---------------------------|
| 约定需求响应 | 日前      | 1.0    | 3.0                       |
| 快速避峰响应 | 2~4 h   | 1.4    | 4.2                       |
| 实时需求响应 | 0~0.5 h | 1.0    | 3.0                       |

而对于需求响应的单位补贴价格,往往通过市场竞价得到,而单一高耗能工业用户要与其他市场主体竞争,报价越高,中标概率越低,因此中标概率与报价之间应该为非线性递减的关系。在统计学中,反正切函数已被用作核心函数来生成新的、更灵活的概率分布族,用于对复杂数据进行建模,且满足非线性递减关系<sup>[14]</sup>,因此在缺乏其他市场主体报价信息的简化研究中,可构建基于反正切函数(arctan)的中标概率模拟模型<sup>[15]</sup>,即

$$P_{user}(I_{user}) = \frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \arctan(I_{user} - I'_{user}) \quad (11)$$

式中： $P_{\text{user}}(I_{\text{user}})$ 为用户在报价 $I_{\text{user}}$ 时的中标概率； $I'_{\text{user}}$ 为中标概率为50%时的用户报价。本文采用最高限价的一半来替代。用户收益最大化模型为

$$\max F_{\text{res},i} = B_{\text{res},i} - C_{\text{res},i} + C_{\text{ele},i} (i=1,2,3) \quad (12)$$

$$B_{\text{res},1} = \delta_1 P_1 T_1 \quad (13)$$

$$B_{\text{res},2} = \delta_2 P_2 T_2 \quad (14)$$

$$B_{\text{res},3} = \delta_3 P_3 T_3 + \omega P_3 \quad (15)$$

$$\delta_i = \tau_i P_{\text{user},i}(I_{\text{user},i}) I_{\text{user},i} \quad (16)$$

$$C_{\text{res},i} = \mu_i x_{\text{total},i}^2 + \gamma_i x_{\text{total},i} \quad (17)$$

$$C_{\text{ele},i} = \pi_m x_{\text{total},i} \quad (18)$$

式中： $F_{\text{res},i}$ 为用户参与第 $i$ 种需求响应( $i=1,2,3$ 分别代表约定需求响应、快速避峰响应和实时需求响应)的总收益； $\delta_i$ 为通过竞价形成的对应需求响应单位补贴价格,元/kWh； $P_1$ 、 $P_2$ 和 $P_3$ 分别为参与约定需求响应、快速避峰响应和实时需求响应的负荷容量,kW； $\tau_i$ 为需求响应场景 $i$ 下的响应速度系数； $I_{\text{user},i}$ 为用户参与第 $i$ 种需求响应的报价,元/kWh； $P_{\text{user},i}(I_{\text{user},i})$ 为中标的概率； $T_1$ 、 $T_2$ 和 $T_3$ 分别为参与约定需求响应、快速避峰响应和实时需求响应的持续时长,h； $\omega$ 为实时需求响应的额外容量补贴,元/kW； $x_{\text{total},i}$ 为用户参与第 $i$ 种需求响应的负荷总响应量大小； $\mu_i$ 和 $\gamma_i$ 分别为响应成本与负荷响应量关系式中的二次项和一次项系数； $\pi_m$ 为 $m$ 时段电价,元/kWh。

### 3.3 模型约束条件

(1) 负荷容量约束:每个参与需求响应的负荷功率不可超过其可调节深度,即

$$0 \leq P_i \leq P_{\text{deep},i} \quad (19)$$

式中： $P_i$ 为第 $i$ 个负荷的容量削减大小,kW； $P_{\text{deep},i}$ 为第 $i$ 个负荷的可调节深度,kW。

(2) 用户报价约束,即

$$0 \leq I_{\text{user},i} \leq I_{\text{max},i} \quad (20)$$

式中： $I_{\text{user},i}$ 为用户参与第 $i$ 种需求响应的报价； $I_{\text{max},i}$ 为对应的最高限价。

观察式(12)可知,这是一个非线性规划问题,本文采用matlab软件结合粒子群算法进行求解。

## 4 实例计算与分析

本文选取了某钢铁工业用户的20个可调负荷作为调控对象(包含电炉、精炼炉、制氧机、轧钢机等不同类型负荷),序号为1,2,...,20。

### 4.1 多时间尺度负荷调控灵活性量化打分

(1) 按照第2节所述方法,通过G1-熵权法-组合赋权法可得到日前、日内、实时3个时间尺度下各

指标的主客权重以及综合权重大小。

(2) 运用TOPSIS法计算各个负荷的调控灵活性综合得分,结果如图5所示。

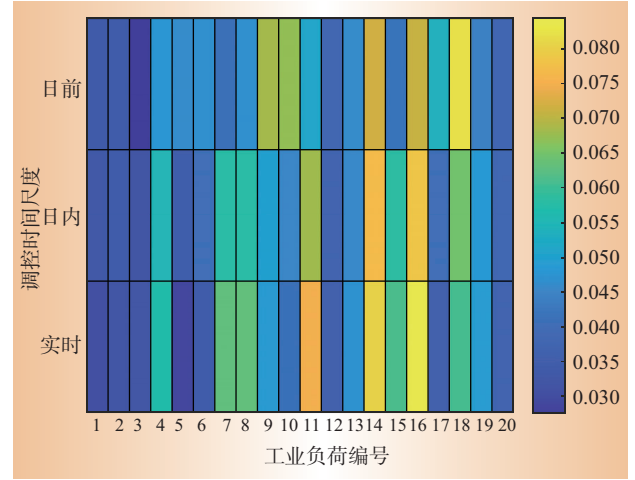


图5 工业负荷多时间尺度调控灵活性得分

Fig. 5 Score on the flexibility of multi-time scale regulation of industrial loads

由图5可以看出,3个时间尺度对应色块的颜色相近的负荷,说明其日前、日内、实时调控灵活性差异较小,反之,灵活性差异较大。具体的差异量化需通过进一步计算相对离散指标得到。

### 4.2 负荷分组与报价模型求解

(1) 计算各个时间尺度调控灵活性的相对离散指标,结果如图6所示,编号为5,6,7,8,9,10,15,17,18的负荷相对离散指标超过了阈值,说明其3个时间尺度的调控灵活性差别较为明显,可直接分入相应调控组别;而编号为1,2,3,4,12,13,14,16,19,20的负荷相对离散指标小于阈值,需要通过2.1节所述方法,提取其响应准备时间,与提前通知时间对比后再二次分组。最终得到各个负荷的分组情况如表2所示。

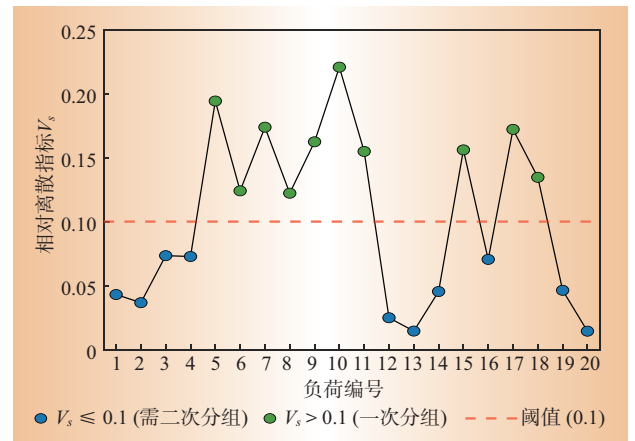


图6 负荷多时间尺度调控灵活性相对离散指标分布

Fig. 6 Load multi-time scale regulation flexibility relative discrete index distribution

表2 负荷参与不同类型需求响应分组情况  
Table 2 Loads participate in different types of demand response groupings

| 需求响应类型 | 参与负荷编号            | 总可调节深度/MW |
|--------|-------------------|-----------|
| 约定需求响应 | 5,6,9,10,17,18    | 69.3      |
| 快速避峰响应 | 1,2,3,12,16,19,20 | 36.0      |
| 实时需求响应 | 4,7,8,11,13,14,15 | 44.8      |

(2) 运用粒子群算法求解高耗能工业用户分组报价模型,结果如图7所示。

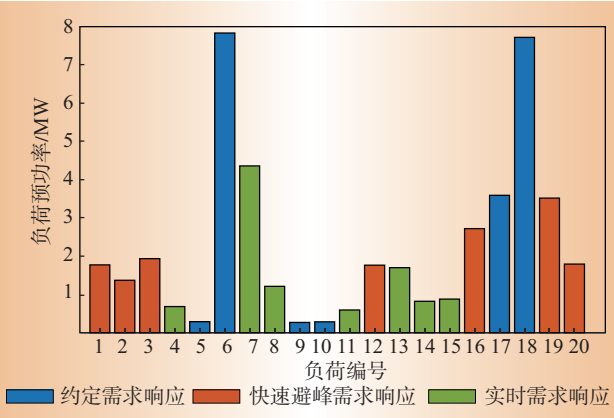


图7 负荷参与不同类型需求响应功率分配情况  
Fig. 7 Loads are involved in the distribution of different types of demand response power

图7所示为该工业用户分别在每一种需求响应收益最大化情况下,各个负荷的预功率规划情况,表3展示了对应的最优申报价格以及申报容量,其中实时需求响应的总收益远高于其他两类,主要原因在于,根据江苏省需求响应细则,相对于约定需求响应和快速避峰响应而言,用户参与实时需求响应获得的补贴中除了度电补贴以外,还有额外的容量补贴(10元/kW),即“度电+容量”两部制补贴,因此符合市场实际情况。

表3 用户参与不同类型需求响应最优报价策略  
Table 3 Users participate in the optimal quotation strategy for different types of demand response

| 需求响应类型 | 申报价格/(元·kWh <sup>-1</sup> ) | 申报容量/MW | 总收益/元     |
|--------|-----------------------------|---------|-----------|
| 约定需求响应 | 1.54                        | 20.00   | 20 016.26 |
| 快速避峰响应 | 1.88                        | 15.00   | 11 211.44 |
| 实时需求响应 | 1.54                        | 10.35   | 53 822.42 |

5 结束语

本文在总结分析高耗能工业用户负荷动态响应特性以及不同时间尺度调控需求的基础上,提出

了一种日前-日内-实时调控灵活性评价方法和基于相对离散指标差异的需求响应分组方法,并对某高耗能工业用户进行了需求响应报价优化,主要得出以下结论:

(1) G1-熵权-TOPSIS法可得到主客观相结合的响应参数权重,并量化各个负荷的多时间尺度调控灵活性大小。

(2) 通过相对离散指标计算以及负荷二次分组方法,可以实现负荷参与不同需求响应类型的动态分组,结合粒子群算法求解高耗能工业用户需求响应收益最大化模型,可使得用户参与各个需求响应类型的经济效益达到最大。

由于篇幅有限,本文尚未对负荷聚合商模式下多用户资源竞价机制进行深入探讨。此外,“负荷分组与响应品种匹配”方案如何考虑现货电价波动,并有效应对新能源功率随机性引发的市场边界条件变化,也需进行深入研究。

参考文献:

[1] 张海静,周颖,王为帅,等. 典型高耗能工业用户发用电经济优化建模及调节潜力研究[J]. 电力需求侧管理,2021,23(2):16-21.  
ZHANG Haijing, ZHOU Ying, WANG Weishuai, et al. Research on the optimization modeling and regulation potential of typical high-energy-consuming industrial users[J]. Power Demand Side Management, 2021, 23(2): 16-21.

[2] 刘国辉,赵佳,孙毅. 基于模糊优化集对分析理论的需求响应潜力评估[J]. 电力需求侧管理,2018,20(6):1-5.  
LIU Guohui, ZHAO Jia, SUN Yi. Evaluation of demand response potential of analytical theory based on fuzzy optimization set [J]. Power Demand Side Management, 2018, 20(6):1-5.

[3] 王鹏,贺焕然,伏凌霄,等. 多品种电力市场交易下负荷聚合商投标策略及市场均衡分析[J]. 电力系统自动化,2024,48(4):111-122.  
WANG Peng, HE Huanran, FU Lingxiao, et al. Bidding strategy of load aggregator and market equilibrium analysis under multi- variety electricity market transactions [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(4):111-122.

[4] 龙禹,王雨薇,任禹丞,等. 基于时序迁移策略的空调负荷需求响应潜力评估[J]. 电力需求侧管理,2025,27(3):11-17.  
LONG Yu, WANG Yuwei, REN Yucheng, et al. Evalua-



- tion of air conditioning load demand response potential based on time series migration strategy [J]. Power Demand Side Management, 2025, 27(3):11-17.
- [5] 张华鲁. 面向电力调峰的柔性负荷群调节能力表征及响应策略研究[D]. 吉林:东北电力大学, 2022.
- ZHANG Hualu. Research on the modulation capacity characterization and response strategy of flexible load groups for power regulation [D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2022.
- [6] 徐青山, 丁一帆, 颜庆国, 等. 大用户负荷调控潜力及价值评估研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(23): 6 791-6 800, 7 070.
- XU Qingshan, DING Yifan, YAN Qingguo, et al. Research on the regulation potential and value assessment of large users' load [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23):6 791-6 800, 7 070.
- [7] 李亚平, 姚建国, 雍太有, 等. 居民温控负荷聚合功率及响应潜力评估方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(19):5 519-5 528, 5 829.
- LI Yaping, YAO Jianguo, YONG Taiyou, et al. Research on the aggregated power and response potential assessment method of residential temperature-controlled load [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(19):5 519-5 528, 5 829.
- [8] 杨景旭, 李钦豪, 张勇军, 等. 考虑电网需求匹配度的多EV聚合商需求响应削峰优化建模[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(8):125-134.
- YANG Jingxu, LI Qin hao, ZHANG Yongjun, et al. Multi-EV aggregator's peak shaving optimization modeling considering grid demand matching degree [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(8):125-134.
- [9] 徐成司, 董树锋, 张舒鹏, 等. 面向工业园区的集中-分布式综合需求响应方法[J]. 电网技术, 2021, 45(2): 489-500.
- XU Chengsi, DONG Shufeng, ZHANG Shupeng, et al. Centralized- distributed integrated demand response method for industrial parks [J]. Power System Technology, 2021, 45(2):489-500.
- [10] 郭昆健, 高赐威, 林国营, 等. 现货市场环境下售电商激励型需求响应优化策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(15):28-35.
- GUO Kunjian, GAO Ciwei, LIN Guoying, et al. Optimization strategy of incentive-based demand response for retailers in spot market environment [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(15):28-35.
- [11] 刘江, 郭云鹏, 张波, 等. 基于云模型和改进证据理论的调峰型虚拟电厂聚合用户优选[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(18):37-45.
- LIU Jiang, GUO Yunpeng, ZHANG Bo, et al. Peak shaving virtual power plant aggregation user optimization based on cloud model and improved evidence theory [J]. Power System Automation, 2022, 46(18):37-45.
- [12] 刘汗清, 沈阳武, 廖思阳, 等. 工业负荷参与电网互动的调控性能综合评价方法[J]. 湖南电力, 2023, 43(1):35-40.
- LIU Hanqing, SHEN Yangwu, LIAO Siyang, et al. Comprehensive evaluation method of industrial load regulation performance participating in grid interaction [J]. Hunan Electric Power, 2023, 43(1):35-40.
- [13] 江苏省发展改革委关于印发江苏省电力需求响应实施细则的通知[S]. 江苏省人民政府公报, 2024, (7): 20-33.
- Notice of jiangsu provincial development and reform commission on printing and distributing the implementation rules for electricity demand response in jiangsu province [S]. Bulletin of the People's Government of Jiangsu Province, 2024, (7):20-33.
- [14] 李翀, 谢秀萍. 基于反正切函数权值累加生成的DGM (1,1)atan模型及其应用[J]. 系统工程理论与实践, 2017, 37(12):3 227-3 234.
- LI Chong, XIE Xiuping. DGM (1,1) atan model generated based on arctangent function weighted accumulation and its application [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2017, 37(12):3 227-3 234.
- [15] 高曦莹, 潘明明, 王志斌, 等. 基于技术经济比较的低压用户业扩报装供电方案综合评价[J]. 供用电, 2019, 36(10):61-66.
- GAO Xiyang, PAN Mingming, WANG Zhibin, et al. Comprehensive Evaluation of Low-Voltage User Industry Expansion Power Supply Schemes Based on Techno-Economic Comparison [J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(10):61-66.

#### 作者简介:

陈朝艺(2000),男,贵州黔南人,硕士研究生,研究方向为柔性负荷调控、电力市场交易与决策;

杨永标(1978),男,江苏南通人,高级工程师,硕士,研究方向为综合能源服务、需求响应;

徐青山(1979),男,江苏泰州人,教授,博士,研究方向为智能配电系统与微网。

(责任编辑 方德康)