

考虑可调节负荷碳减排效益的平台主导型需求响应交易方法

官飞翔^{1,2}, 徐靖^{1,2}, 陈宋宋^{1,2}, 李德智^{1,2}

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192; 2. 需求侧多能互补优化与供需互动技术北京市重点实验室, 北京 100192)

摘要:需求响应(demand response, DR)交易不仅可以促进电力供需平衡,还有减少碳排放的潜力。为挖掘可调节负荷(adjustable loads, ALs)参与DR交易的碳减排潜力,要求ALs在参与DR交易获得经济效益的同时,还应获得碳减排收益。首先,考虑ALs对降低碳排放量作用,提出基于响应量和碳减排量的双激励型需求响应竞价模型。其次,基于提出的双激励型需求响应竞价模型,提出了计及碳交易的平台主导型需求响应交易模式。然后,采用模糊决策法,求解提出的多目标模型在解集空间内的Pareto最优解。最后,在改进的IEEE 30节点系统上,研究了工业用户、商业用户、居民用户、电动汽车充电区、5G基站等5类ALs的碳减排效果,验证所提模型的有效性。

关键词:需求响应;碳排放;可调节负荷;竞价模型

Platform-led demand response trading approach considering carbon reduction benefits of adjustable loads

GONG Feixiang^{1,2}, XU Jing^{1,2}, CHEN Songsong^{1,2}, LI Dezhi^{1,2}

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 2. Beijing Key Laboratory of Demand-Side Multi-energy Complementary Optimization and Supply-Demand Interaction Technology, Beijing 100192, China)

Abstract: Demand response trading not only promotes the balance between electricity supply and demand, but also has the potential to reduce carbon emissions. The carbon emission reduction potential of ALs participating in DR trading is explored. Therefore, the economic benefits of ALs' participation in DR trading should be accompanied by carbon emission reduction benefits. Firstly, considering the role of ALs in reducing carbon emissions, a dual incentive type of demand response model based on response volume and carbon emission reduction is proposed. Secondly, based on the proposed dual incentive type of demand response model, a platform-led demand response trading model is proposed to account for carbon trading. Then, the fuzzy decision-making method is used to solve the Pareto optimal solution of the proposed multi-objective model in the solution set space. Finally, the carbon reduction effects of five types of ALs, industrial customers, commercial customers, residential customers, electric vehicle charging zones, and 5G base stations, are investigated on the improved IEEE 30-node system to verify the effectiveness of the proposed model.

Key words: demand response; carbon emissions; adjustable loads; bidding models

0 引言

随着碳排放量的持续攀升,电力行业亟待向绿色低碳转型。除考虑源侧减碳策略外,还应挖掘需求侧的减碳潜力^[1]。需求响应交易是一种兼顾源荷的交易手段,且交易时段一般都是用电高峰期,ALs在提供响应量的同时本身就有碳减排的效果^[2]。因此,充分发挥参与DR交易的ALs碳减排潜力具有重要意义。

依据DR参与者是否通过合作参与交易,可将ALs参与DR的交易模式分为基于合作博弈的交易模式和基于非合作博弈的交易模式。基于非合作博弈的交易模式又可分为平台主导型交易模式和参与者主导型交易模式。其中,在基于合作博弈的交易模式中,参与者形成联盟,集中加入管理,以提高联盟整体利益。相比之下,平台主导型交易模式中,平台作为参与者交易的中介,起到了激励买卖双方交易的作用,有助于在收益较好的同时促进响应量的交易^[3]。因此,在DR低碳化改造的过程中,为实现参与者利益和交易量的最优化,本文采用平台主导型交易模式。

在DR交易低碳化改造方面已有许多研究。这些

收稿日期:2024-03-08;修回日期:2024-04-21

基金项目:中国电力科学研究院有限公司科技项目(52420021N06R)

研究通过在目标函数中引入碳交易成本^[4]、在挖掘需求侧响应潜力时考虑响应潜力的减排潜力^[5]或在约束条件中增加碳减排指标相关约束^[6],达到低碳效果。但上述文献只在传统DR交易模式中引入碳排放作为模型目标函数或增加约束条件以达到减排效果,没有从DR交易竞价的角度进一步挖掘用户的减排潜力。

低碳DR交易的激励价格制定也是热点问题。基于用户的差异化响应特性和减排潜力,文献[7]制定差异化的激励策略。文献[8]建立了考虑低碳需求响应的综合能源系统供需主从博弈优化调度模型。本文为充分考虑ALs对降低碳排放量的作用,对竞价模型进行改进,从响应量和碳减排量两个角度建立双激励竞价模型。

综上,本文针对上述两个低碳化DR交易研究不足,在现有研究的基础上提出计及碳交易的平台主导型需求响应交易模型。通过构建低碳交易潜力指标和响应潜力指标,对参与DR交易的ALs的低碳潜力和可调潜力两方面进行分析。

1 传统平台主导型需求响应交易模式

平台主导型需求响应交易模式考虑各参与者的利益冲突及策略行为下的均衡,可描述为一个两阶段决策过程。第一阶段中,平台作为先行者,发布交易的购买或销售价格,旨在最大化自身收益。第二阶段中,接收到交易价格后,每个参与者以收益最大化为目标,决定其响应量。本文中参与者包括两个部分:电网侧即响应量的购买方和ALs即响应量的销售方(提供方)。传统平台主导型需求响应交易模式的模型可以描述如下。

1.1 第一阶段(平台)决策模型

$$\max B^{\text{pt}} \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \begin{cases} G^{\text{pt}}(\lambda^{\text{dr}}, P^{\text{dr}}(\lambda^{\text{dr}})) \leq 0 \\ \sum_i P_i^{\text{sdr}}(\lambda_i^{\text{dr}}) = P^{\text{bdr}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: C^{pt} 为平台定价出清的目标函数; λ_i^{dr} 为第一阶段决策模型的决策变量,是由平台发布的对应于每个参与者的响应价格; P_i^{sdr} 、 P^{bdr} 分别为ALs的售卖的响应量、电网购买的响应量。约束条件包括平台运行约束和响应量出清约束。

1.2 第二阶段(参与者)决策模型

(1) ALs的交易模型

$$\max B_i^{\text{th}} = T_i^{\text{dr}} - C_i^{\text{gd}} \quad (3)$$

$$\text{s.t.} \quad \begin{cases} P_i^{\text{bas}} + P_i^{\text{sdr}} = P_i^{\text{load}} \\ G_i(P_i^{\text{bas}}, P_i^{\text{sdr}}) \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: B_i^{th} 、 C_i^{gd} 、 T_i^{dr} 分别为ALs参与交易的总收益、购电成本、参与交易获得的收益; P_i^{bas} 、 P_i^{load} 为原始用电量、参与交易后的用电量; λ_i^{sdr} 为售卖响应量的价格。约束条件包括用电平衡约束和ALs运行约束两类。

(2) 电网运营商的交易模型

$$\max B^{\text{dw}} = B^{\text{dr}} - C^{\text{dr}} \quad (5)$$

$$\text{s.t.} \quad \begin{cases} \sum_i P_i^{\text{load}} = G^{\text{grid}} \\ W(P^{\text{bas}}, P^{\text{bdr}}) \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: B^{dw} 、 C^{dr} 、 B^{dr} 分别为电网参与交易的总收益、购买响应量的成本、电网稳定性提高的等价收益。约束条件包括发电平衡约束和电网运行约束。

上述平台主导型需求响应交易模式没有考虑需求响应交易与碳排放的耦合。虽然传统模型具有较好的经济性,但是忽略了ALs的碳减排效益。

2 考虑碳交易的平台主导的需求响应交易模式

本节在传统平台主导的需求响应交易模式的基础上,首先提出考虑ALs碳效益的激励型需求响应竞价流程,然后提出考虑碳效益的平台主导型需求响应交易模型。

2.1 考虑ALs碳效益的激励型需求响应竞价流程

本文提出考虑ALs碳效益的需求响应包括两个价格:响应量激励价格和碳减排激励价格。竞价流程如图1所示。

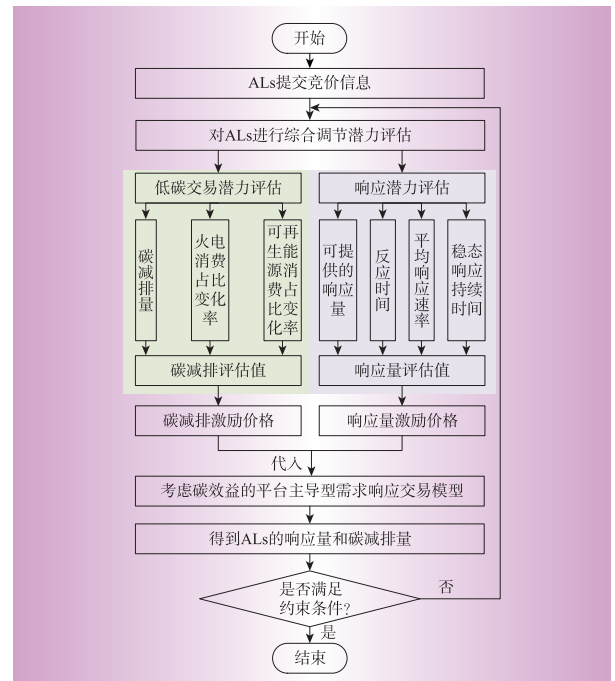


图1 考虑ALs碳效益的激励型需求响应竞价流程

Fig. 1 Incentivised demand response bidding flow considering carbon benefits of ALs

评估指标包括低碳交易潜力指标和响应潜力指标两大类,具体如下

(1) 低碳交易潜力指标

① 碳减排量

$$E_{t,l}^{\text{ptbce}} = E_{t,l}^{\text{ce}'} - E_{t,l}^{\text{ce}} \quad (7)$$

式中: $E_{t,l}^{\text{ce}'}$ 、 $E_{t,l}^{\text{ce}}$ 分别为不参与交易、参与交易导致的碳排放量。

② 火电消费占比变化率

$$\rho_{t,l}^{\text{ie}} = (R_{t,l}^{\text{ie}'} - R_{t,l}^{\text{ie}}) / R_{t,l}^{\text{ie}'} \quad (8)$$

式中: $R_{t,l}^{\text{ie}'}$ 、 $R_{t,l}^{\text{ie}}$ 分别为不参与、参与时火电消费占比。

③ 可再生能源消费占比变化率

$$\rho_{t,l}^{\text{re}} = (R_{t,l}^{\text{re}'} - R_{t,l}^{\text{re}}) / R_{t,l}^{\text{re}'} \quad (9)$$

式中: $R_{t,l}^{\text{re}'}$ 、 $R_{t,l}^{\text{re}}$ 分别为不参与、参与时可再生能源消费占比。

(2) 响应潜力指标

① 可提供的响应量

$$P_{t,l}^{\text{ptbdr}} = \min\{\alpha_i \lambda_{t,l}^{\text{ptb}} + \beta_i \mu_{t,l}^{\text{ptb}}, P_{t,l}^{\text{dr,max}}\} \quad (10)$$

式中: $P_{t,l}^{\text{dr,max}}$ 为 ALs 能够提供响应量的最大值; $\lambda_{t,l}^{\text{ptb}}$ 、 $\mu_{t,l}^{\text{ptb}}$ 分别为响应激励价格、碳减排激励价格; α_i 、 β_i 分别为响应量与响应激励价格、碳减排激励价格相关的正向系数。

② 反应时间

$$T_{t,l}^f = t_{t,l}^3 - t_{t,l}^1 \quad (11)$$

式中: $t_{t,l}^1$ 为响应信号下发时刻; $t_{t,l}^3$ 为达到 $0.5 P_{t,l}^{\text{ptbdr}}$ 对应的时刻。

③ 平均响应速率

$$v_{t,l}^{\text{xy}} = P_{t,l}^{\text{ptbdr}} / (t_{t,l}^4 - t_{t,l}^1) \quad (12)$$

式中: $t_{t,l}^4$ 为达到 $0.95 P_{t,l}^{\text{ptbdr}}$ 对应的时刻。

④ 稳态响应持续时间

$$T_{t,l}^{\text{ex}} = t_{t,l}^4 - t_{t,l}^2 \quad (13)$$

式中: $t_{t,l}^2$ 为达到 $0.1 P_{t,l}^{\text{ptbdr}}$ 对应的时刻。

平台分别得到每个 ALs 的各项评估指标值后,对其进行归一化处理,并将所有归一化的指标进行加权相加。权重采用层次分析法得出,从而得到每个 ALs 的双评估值。双评估值是指通过上述 7 个归一化评估指标值,利用不同的权重计算得出的响应量评估值和碳减排评估值。

最后,判断是否满足响应量和碳减排量是否满足式(14),若不满足,返回第二步,若满足,输出响应量激励价格和碳减排激励价格。

$$\begin{cases} \sum_l P_{t,l}^{\text{ptbdr}} \geq P_t^{\text{dr,min}} \\ \sum_l E_{t,l}^{\text{ptbce}} \geq E_t^{\text{ce,min}} \end{cases} \quad (14)$$

式中: $P_t^{\text{dr,min}}$ 、 $E_t^{\text{ce,min}}$ 分别为平台对 ALs 提供响应量、碳减排量的最低要求。

2.2 考虑碳效益的平台主导型需求响应交易模型

2.2.1 目标函数

(1) 平台

$$\min B^{\text{pt,gi}} = \min\{B^{\text{d}} + B^{\text{c}} - C^{\text{ptdw}} - C^{\text{ptfh}}\} \quad (15)$$

式中: $B^{\text{pt,gi}}$ 为该模式下平台的总收益,由促成响应量交易收益 B^{d} 、促成碳排放量交易收益 B^{c} 、给电网的补贴成本 C^{ptdw} 、给 ALs 的补贴成本 C^{ptfh} 构成,分别计算如下

$$B^{\text{d}} = \sum_t P_t^{\text{ptbdr}} \lambda_t^{\text{pts}} - \sum_l \sum_t P_{t,l}^{\text{ptbdr}} \lambda_{t,l}^{\text{ptb}} \quad (16)$$

$$B^{\text{c}} = \sum_t E_t^{\text{ptbce}} \mu_t^{\text{pts}} - \sum_l \sum_t E_{t,l}^{\text{ptbce}} \mu_{t,l}^{\text{ptb}} \quad (17)$$

$$C^{\text{ptdw}} = \sum_t (P_t^{\text{ptbdr}} \tau_t^{\text{dr,dw}} + E_t^{\text{ptbce}} \tau_t^{\text{ce,dw}}) \quad (18)$$

$$C^{\text{ptfh}} = \sum_l \sum_t (P_{t,l}^{\text{ptbdr}} \tau_{t,l}^{\text{dr,flh}} + E_{t,l}^{\text{ptbce}} \tau_{t,l}^{\text{ce,flh}}) \quad (19)$$

式中: P_t^{ptbdr} 、 E_t^{ptbce} 分别为 t 时段售卖给电网的响应量、碳减排量; λ_t^{pts} 、 μ_t^{pts} 分别为平台向电网售卖响应量、碳减排量的价格; $\tau_t^{\text{dr,dw}}$ 、 $\tau_t^{\text{ce,dw}}$ 分别为平台给电网的响应量、碳减排量奖励价格; $\tau_{t,l}^{\text{dr,flh}}$ 、 $\tau_{t,l}^{\text{ce,flh}}$ 分别为平台给 ALs 的响应量、碳减排量奖励价格。

(2) ALs

$$\max B_l^{\text{alr,pt}} = \max\{T_l^{\text{dr,pt}} + R_l^{\text{ce,pt}} + B_l^{\text{ptfh}} - C_l^{\text{gd,pt}} - C_l^{\text{dr,pt}}\} \quad (20)$$

式中: $C_l^{\text{alr,pt}}$ 为该模式下 AL_{*l*} 的成本,由购电成本 $C_l^{\text{gd,pt}}$ 、参与交易成本 $C_l^{\text{dr,pt}}$ 、提供响应量收益 $T_l^{\text{dr,pt}}$ 、提供碳减排量收益 $R_l^{\text{ce,pt}}$ 、平台补贴收益 B_l^{ptfh} 构成,具体计算如下

$$C_l^{\text{gd,pt}} = \sum_t (P_{t,l}^{\text{bas}} - P_{t,l}^{\text{ptbdr}}) \lambda_t^{\text{sp}} \quad (21)$$

$$C_l^{\text{dr,pt}} = \sum_t (C_{t,l}^{\text{loss}} + C_{t,l}^{\text{ext}}) \quad (22)$$

$$= \sum_t \left\{ \left[\Pi_{t,l}^{\text{loss}} [P_{t,l}^{\text{ptbdr}} - P_{t,l}^{\text{ext}}] v_{t,l}^{\text{dr,loss}} + \left[a_{t,l}^{\text{ext}} (P_{t,l}^{\text{te,ext}})^2 + b_{t,l}^{\text{ext}} P_{t,l}^{\text{te,ext}} + c_{t,l}^{\text{ext}} \right] \right] \right\}$$

$$T_l^{\text{dr,pt}} = \sum_t P_{t,l}^{\text{ptbdr}} \lambda_{t,l}^{\text{ptb}} \quad (23)$$

$$R_l^{\text{ce,pt}} = \sum_t E_{t,l}^{\text{ptbce}} \mu_{t,l}^{\text{ptb}} \quad (24)$$

$$B_l^{\text{ptfh}} = \sum_t (P_{t,l}^{\text{ptbdr}} \tau_{t,l}^{\text{dr,flh}} + E_{t,l}^{\text{ptbce}} \tau_{t,l}^{\text{ce,flh}}) \quad (25)$$

式中: λ_t^{sp} 为购电价格; $C_{t,l}^{\text{loss}}$ 、 $C_{t,l}^{\text{ext}}$ 分别为用电量下降损失成本、自身额外发电成本; $v_{t,l}^{\text{dr,loss}}$ 为单位响应量导致的损失成本; $a_{t,l}^{\text{ext}}$ 、 $b_{t,l}^{\text{ext}}$ 、 $c_{t,l}^{\text{ext}}$ 为自身火电机组成成本系数。

(3) 电网运营商

$$\max B^{\text{dw,pt}} = \max\{B^{\text{dr,pt}} + B^{\text{ce,pt}} + B^{\text{ptdw}} - C^{\text{dr,pt}} - C^{\text{bce,pt}}\} \quad (26)$$

式中: $B^{\text{dw,pt}}$ 为电网在该模式下的总收益,由购买响应

量成本 $C^{\text{dbr,pt}}$ 、购买碳减排成本 $C^{\text{bce,pt}}$ 、购买响应量获得的收益 $B^{\text{dr,pt}}$ 、购买碳减排量获得的收益 $B^{\text{ce,pt}}$ 、平台补贴收益 B^{ptdw} 组成,具体计算如下

$$C^{\text{dbr,pt}} = P_t^{\text{ptsdr}} \lambda_t^{\text{pts}} \quad (27)$$

$$C^{\text{bce,pt}} = E_t^{\text{ptsce}} \mu_t^{\text{pts}} \quad (28)$$

$$B^{\text{dr,pt}} = \sum_t P_t^{\text{ptsdr}} \sigma_t^{\text{stab}} \quad (29)$$

$$B^{\text{ce,pt}} = \sum_t E_t^{\text{ptsce}} \mu_t^{\text{bca}} \quad (30)$$

$$B^{\text{ptdw}} = C^{\text{ptfh}} \quad (31)$$

式中: σ_t^{stab} 为单位响应量电网稳定价格。

2.2.2 约束条件

(1) 平台

$$\lambda_t^{\text{pts}} \geq \lambda_{t,l}^{\text{ptb}} + \tau_t^{\text{dr,dw}} + \tau_t^{\text{dr,fb}}, \forall l \quad (32)$$

$$\mu_t^{\text{pts}} \geq \mu_{t,l}^{\text{ptb}} + \tau_t^{\text{ce,dw}} + \tau_t^{\text{ce,fb}}, \forall l \quad (33)$$

(2) ALs

$$P_{t,l}^{\text{bas}} - P_{t,l}^{\text{ptbdr}} + P_{t,l}^{\text{ext}} = P_{t,l}^{\text{act}} \quad (34)$$

$$\underline{P}_{t,l}^{\text{te,ext}} \leq P_{t,l}^{\text{te,ext}} \leq \overline{P}_{t,l}^{\text{te,ext}} \quad (35)$$

$$\begin{cases} P_{t,l}^{\text{te,ext}} - P_{t-1,l}^{\text{te,ext}} \leq \overline{R}_{t,l}^{\text{te,sp}}, P_{t,l}^{\text{te,ext}} \geq P_{t-1,l}^{\text{te,ext}} \\ P_{t,l}^{\text{te,ext}} - P_{t-1,l}^{\text{te,ext}} \leq \overline{R}_{t,l}^{\text{te,sp}}, P_{t,l}^{\text{te,ext}} < P_{t-1,l}^{\text{te,ext}} \end{cases} \quad (36)$$

$$\underline{P}_{t,l}^{\text{re,ext}} \leq P_{t,l}^{\text{re,ext}} \leq \overline{P}_{t,l}^{\text{re,ext}} \quad (37)$$

式中: $P_{t,l}^{\text{act}}$ 为实际用电量; $\overline{P}_{t,l}^{\text{te,ext}}$ 、 $\underline{P}_{t,l}^{\text{te,ext}}$ 为负荷自身火电机组出力上、下限; $\overline{R}_{t,l}^{\text{te,sp}}$ 、 $\underline{R}_{t,l}^{\text{te,sp}}$ 为上坡、下坡的功率上限; $\overline{P}_{t,l}^{\text{re,ext}}$ 、 $\underline{P}_{t,l}^{\text{re,ext}}$ 为自身可再生能源机组出力上、下限。

(3) 电网运营商

$$\sum_g P_{t,g}^{\text{te,dw}} + \sum_r P_{t,r}^{\text{re,dw}} - P_t^{\text{ptsdr}} = P_t^{\text{adr}} \quad (38)$$

$$\underline{P}_{t,g}^{\text{te,dw}} \leq P_{t,g}^{\text{te,dw}} \leq \overline{P}_{t,g}^{\text{te,dw}} \quad (39)$$

$$\begin{cases} P_{t,g}^{\text{te,dw}} - P_{t-1,g}^{\text{te,dw}} \leq \overline{R}_g^{\text{dwte,sp}}, P_{t,g}^{\text{te,dw}} \geq P_{t-1,g}^{\text{te,dw}} \\ P_{t,g}^{\text{te,dw}} - P_{t-1,g}^{\text{te,dw}} \leq \overline{R}_g^{\text{dwte,sp}}, P_{t,g}^{\text{te,dw}} < P_{t-1,g}^{\text{te,dw}} \end{cases} \quad (40)$$

$$\underline{P}_{t,r}^{\text{re,dw}} \leq P_{t,r}^{\text{re,dw}} \leq \overline{P}_{t,r}^{\text{re,dw}} \quad (41)$$

式中: $P_{t,g}^{\text{te,dw}}$ 、 $P_{t,r}^{\text{re,dw}}$ 分别为未参与交易时电网火电机组出力、可再生能源机组出力; $\overline{P}_{t,g}^{\text{te,dw}}$ 、 $\underline{P}_{t,g}^{\text{te,dw}}$ 分别为电网火电机组出力上、下限; $\overline{R}_g^{\text{dwte,sp}}$ 、 $\underline{R}_g^{\text{dwte,sp}}$ 分别为电网火电机组上坡、下坡的功率上限; $\overline{P}_{t,r}^{\text{re,dw}}$ 、 $\underline{P}_{t,r}^{\text{re,dw}}$ 分别为电网可再生能源机组出力上、下限; i 、 I^{DN} 分别为表示电网节点的下标、电网节点集合。

3 求解方法

多目标模型需要在解集空间内搜寻 Pareto 最优

解,即在目标函数空间内的非支配解。本文选用模糊决策法得到非支配解中的最优解,最优解通过解集与理想点的距离确定,其求解步骤如下:首先归一化目标函数,然后确定每个归一化后目标函数最小值,选择理想点和最小空间距离。考虑到3个目标函数的权重不同,为体现需求响应交易中低碳的重要性,将目标函数1的权重定为0.2,目标函数2和3的权重为0.4。

4 算例分析

4.1 算例背景

本文利用 IEEE 30 节点进行仿真验证所提交易模型的有效性,并选用工业用户、商业用户、居民用户、电动汽车充电区域、5G 基站 5 类 ALs。IEEE 30 节点系统结构如图 2 所示。表 1 将这 18 个 ALs 按照进行编号。

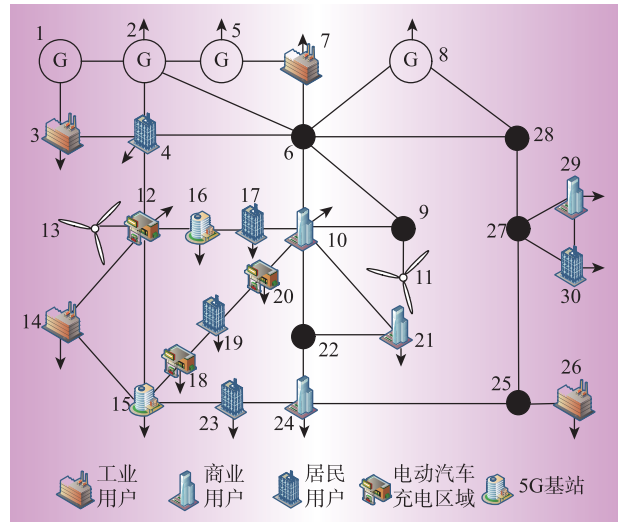


图2 改进的IEEE 30节点系统

Fig. 2 Modified IEEE 30-node system

表1 ALs对应节点和编号

Table 1 Adjustable loads corresponding nodes and numbers

节点	编号	节点	编号	节点	编号
3	101	24	107	30	113
7	102	29	108	12	114
14	103	4	109	18	115
16	104	17	110	20	116
10	105	19	111	15	117
21	106	23	112	16	118

算例选取 10:00—13:00, 17:00—22:00 为交易时段,分别编号为时段 1—8。ALs 参与需求响应交易的基础价格如表 2 所示。电网购买碳配额的价格为 0.26 元/kg。

表2 ALs参与需求响应的基础价格

Table 2 Base prices when ALs participate in demand response

价格	工商业与5G基站	居民用户	电动汽车充电区域
响应量基价	0.804	0.784	0.823
碳减排基价	0.223	0.223	0.223
购电价格	0.739	0.558	0.739
损失价格	0.741	0.472	0.741

4.2 模型的有效性分析

传统平台主导的需求响应交易模式下,平台总收益为1 984.804 1元,电网运营商的总收益为9 350.962 9元。而考虑碳的平台主导的交易模式下,平台、电网运营商的总收益分别为2 966.059 2元和12 005.880 1元。图3对比了在两种交易模式下,ALs提供的响应量和碳减排量。在本文所提的考虑碳效益的平台主导型交易模式下,平台和电网运营商的总收益均高于传统模式。在传统模式下,各类ALs在提供响应量的同时也达到了碳减排的效果。但是,在本文所提的模式下,各类ALs在提供的响应量更多,碳减排效果也更好。

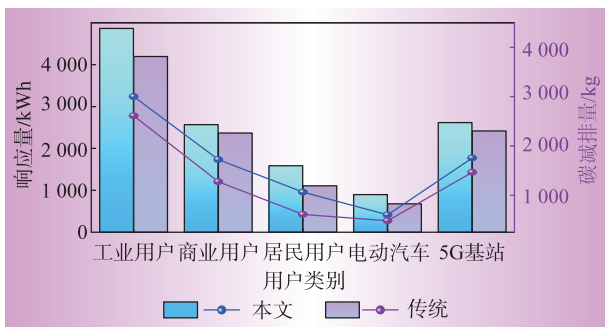


图3 两种交易模式下ALs响应量和碳减排量对比

Fig. 3 Comparison of response volume and carbon emission reduction for each type of adjustable load under two trading models

4.3 需求响应结果分析

图4以4时段为例,给出了ALs参与交易的竞价结果。编号为105、106用户的响应量激励价格和碳减排激励价格均为0。这是因为它们的总体评估值太低,这两个负荷被筛选出去了。

图5和图6分别给出了所提交易模式下平台和电网的各项成本收益和总收益。平台和电网每个时段的总收益基本稳定在400元和1 600元。

图7给出了5类ALs的总响应量和总碳减排量。其中,在1—8时段工业用户的总响应量和总碳减排量均高于其他类型的负荷。

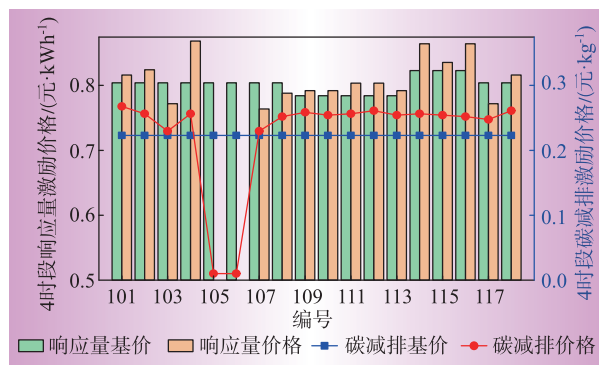


图4 4时段ALs的竞价结果

Fig. 4 Auction results of adjustable loads in period 4

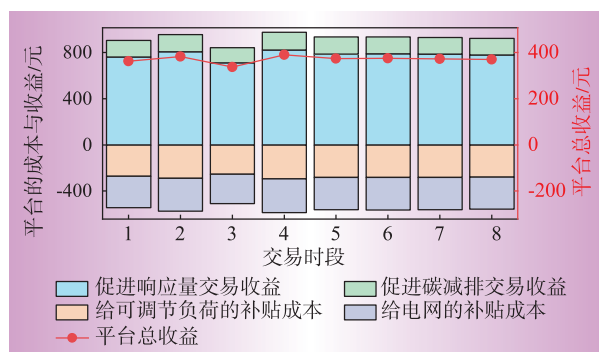


图5 平台的成本收益与总收益

Fig. 5 Cost-benefit and total benefit of the platform

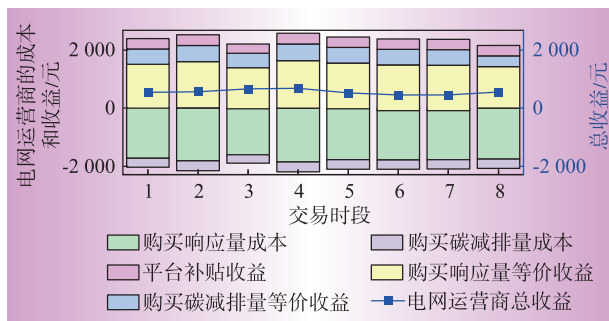


图6 电网运营商的成本收益与总收益

Fig. 6 Cost-benefit and total benefit of the grid operator

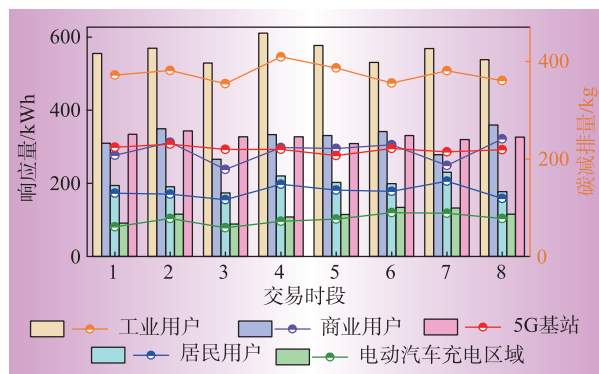


图7 各类型ALs响应量、碳减排量交易结果

Fig. 7 Trading results of response volume and carbon emission reduction for each type of adjustable loads

图8给出了3个目标函数权重变化,对交易的碳减排结果的影响。从图8可以看出,平台目标函数的权重过大,碳减排的效果不佳。

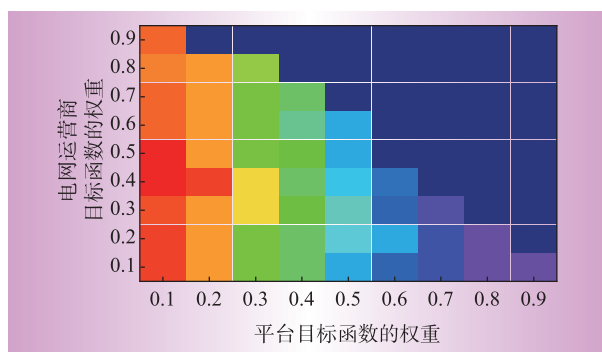


图8 目标函数权重对碳减排结果的影响

Fig. 8 Impact of objective function weights on carbon emission reduction outcomes

5 结束语

本文充分考虑ALs参与DR交易的碳减排效益,提出考虑碳效益的平台主导型需求响应交易模型。在传统激励型DR需求侧竞价模型的基础上,考虑ALs对降低碳排放量的效果,提出基于响应量和碳减排量的双激励型需求响应竞价模型。并将改进的竞价模型用于平台主导型需求响应交易模式,形成考虑碳效益的平台主导型需求响应交易模型。通过改进的IEEE 30节点系统,在所提模型下对5类ALs进行优化分析。从优化结果可以看出,相较于传统模型,在本文所提的DR交易模型下平台和电网的总收益更高,各类ALs在提供的响应量更多、碳减排效果更好。D

参考文献:

- [1] 徐慧慧,田云飞,缪猛,等. 计及碳交易和需求响应的虚拟电厂低碳经济调度[J]. 智慧电力, 2023, 51(8): 1-7.
XU Huihui, TIAN Yufei, LIAO Meng, et al. Low carbon economy dispatch of virtual power plants considering carbon trading and demand response[J]. Smart Power, 2023, 51(8): 1-7.
- [2] 胡福年,周小博,张彭成,等. 计及源荷协调的综合能源系统日前-日内两阶段低碳经济优化调度[J/OL]. 控制工程: 1-13.
HU Funian, ZHOU Xiaobo, ZHANG Pengcheng, et al. Two-stage low-carbon economic optimization scheduling of integrated energy system with coordinated source and

load[J/OL]. Control Engineering of China: 1-13.

- [3] 吴英俊,刘成骏,林智威,等. 考虑成本与收益摊配的电力需求响应博弈模型[J]. 电力建设, 2021, 42(6): 135-144.
WU Yingjun, LIU Chengjun, LIN Zhiwei, et al. Game model of electric demand response considering benefit sharing and cost allocation[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(6): 135-144.
- [4] 杨周义,邢海军,江伟建,等. 基于低碳需求响应的含煤制氢与碳捕集电厂的综合能源系统优化调度[J/OL]. 电力自动化设备: 1-16.
YANG Zhouyi, XING Haijun, JIANG Weijian, et al. Optimal scheduling of an integrated energy system based on low-carbon demand response for a power plant with coal hydrogen production and carbon capture[J/OL]. Electric Power Automation Equipment: 1-16.
- [5] 姚强,王方胜. 计及需求响应的居民社区综合能源系统多目标优化调度[J]. 电力需求侧管理, 2023, 25(2): 36-42.
YAO Qiang, WANG Fangsheng. Multi-objective optimal scheduling of residential community integrated energy system considering demand response[J]. Demand Side Management. 2023, 25(2): 36-42.
- [6] 李学平,卢志刚,王浩锐,等. 考虑碳减排日指标约束的碳捕集调度策略[J/OL]. 中国电机工程学报, 2012, 32(31): 159-165, 232.
LI Xueping, LU Zhigang, WANG Haorui, et al. Dispatch strategy for carbon capture considering day index constraints in carbon emission reduction[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(31): 159-165, 232.
- [7] 许刚,郭子轩. 考虑用户比价行为的综合需求响应低碳优化策略[J/OL]. 电网技术: 2024, 48(3): 1 043-1 054.
XU Gang, GUO Zixuan. Low-carbon optimization strategy of integrated demand response considering user's price comparison behavior[J/OL]. Power System Technology: 2024, 48(3): 1 043-1 054.
- [8] 高玉,王琦,陈严,等. 考虑需求响应和能量梯级利用的含氢综合能源系统优化调度[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(4): 51-59.
GAO Yu, WANG Qi, CHEN Yan, et al. Optimal dispatch of integrated energy system with hydrogen considering demand response and cascade energy utilization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(4): 51-59.

(责任编辑 水 鹤)