

考虑用户碳排放强度的电碳耦合日前市场 多阶段出清模型

张大波¹,曹壮壮²,王宗瑞¹,吴帆¹,孙飞³

(1. 新能源利用与节能安徽省重点实验室(合肥工业大学),合肥 230009;2. 国网河南省电力公司 南阳供电公司,河南 南阳 473000;3. 安徽继远软件有限公司,合肥 230093)

摘要:用户侧具有减碳潜力且报量报价可提升市场灵活性,但其中标量的不确定性易导致需求缺口。为满足不同用户需求,根据是否对未中标量有需求和同意需求调整将其分为3类,建立电碳耦合日前市场多阶段出清模型。第一阶段建立以社会福利最大为目标的出清模型,所有用户进行该阶段结算;第二阶段建立以系统总成本最小为目标的出清模型,对未中标量有需求的用户进行偏差结算;第三阶段建立考虑用户碳排放强度的出清模型,同意需求调整的用户进行偏差结算。改进的PJM5节点系统计算结果表明该模型不仅能灵活满足用户需求,而且可以减少系统成本、碳排放量和用户购电费用。

关键词:电碳耦合日前市场;用户侧报量报价;用户碳排放强度

Multi-stage clearing model for the electricity-carbon coupled day-ahead market considering users' carbon emission intensity

ZHANG Dabo¹, CAO Zhuangzhuang², WANG Zongrui¹, WU Fan¹, SUN Fei³

(1. Anhui Province Key Laboratory of Renewable Energy Utilization and Energy Saving (Hefei University of Technology), Hefei 230009, China; 2. Nanyang Power Supply Company, State Grid Henan Electric Power Company, Nanyang 473000, China; 3. Anhui Jiyuan Software Co., Ltd., Hefei 230093, China)

Abstract: While user-side carbon reduction potential and quantity-price bidding enhance market flexibility, the uncertainty in cleared quantities may trigger demand-supply mismatch. To address diverse user needs, participants are categorized into three types based on their unmet demand for uncleared quantities and demand adjustment willingness, establishing a multi-stage clearing model for electricity-carbon coupled day-ahead markets. In the first stage, the clearing model with the goal of maximizing social welfare is established, and all users carry out settlement at that stage. In the second stage, the clearing model with the goal of minimizing total system cost is established, and users with demand for unsuccessful bids carry out deviation settlement. In the third stage, the clearing model with consideration of the users' carbon intensity is established, and users agreeing to demand adjustment carry out deviation settlement. The computational results of the improved PJM5 node system show that the model not only flexibly meets user demands, but also reduces system costs, carbon emissions, and user costs.

Key words: electricity-carbon coupled day-ahead market; user-side quantity and price bidding; users' carbon emission intensity

0 引言

用户侧报量报价可以增强用户市场参与度,真实反映供需关系^[1]。2019年6月初,在第三届电力市场国际峰会上,南方能源监管局表示:发用两侧都报量报价的阶段即将到来^[2]。2024年9月5日,甘肃首次允许用户以“报量报价”形式参与电力现货市场^[3]。文献[1]通过构建规避风险的双边交易模型,提升了市场安全性。文献[4]通过分析单、双侧

报价对日前市场的影响,验证了双侧报价可以促进市场竞争。然而,在用户报量报价形式下,中标量是不确定的。当用户对未中标量仍有需求时,建立相应的出清机制可以提高资源利用率。

电碳市场的耦合出清是保证低碳性和经济性的重要手段。文献[5]分析了碳市场不同阶段下节点边际电价的构成以及碳配额约束对电价的影响。文献[6]将机组碳配额和电能量分配相关联,建立了电碳深度耦合的多阶段出清模型,减少了碳排放和发电成本。文献[7]从机组的动态碳排放强度出发,通过等面积原则计算得到的阶梯碳排放强度来降低碳排放误差。然而,上述文献未考虑用户

侧对减碳的影响^[8]。部分学者基于碳排放流理论对用户减碳潜力进行研究^[9-11]。文献[11]在电碳耦合市场模型中分析了用户在减碳中的作用,但未考虑用户侧的报量报价以及机组启停、备用容量等约束。

综上所述,首先将用户分类,然后建立考虑用户碳排放强度的电碳耦合日前市场多阶段出清模型。第一阶段建立用户报量报价,以社会福利最大为目标的出清模型,所有用户进行第一阶段结算;第二阶段建立用户仅报量,以系统发电成本和碳交易成本最小为目标的出清模型,需要未中标电量的用户进行偏差结算;第三阶段基于碳排放流理论^[12],建立考虑用户碳排放强度的市场出清模型,通过用户侧进一步实现减碳目标,同意需求调整的用户进行偏差结算。最后通过算例分析验证模型有效性。

1 电碳耦合市场日前多阶段模型出清架构

所提的考虑用户碳排放强度的电碳耦合市场日前多阶段模型的出清和结算流程如图1所示。

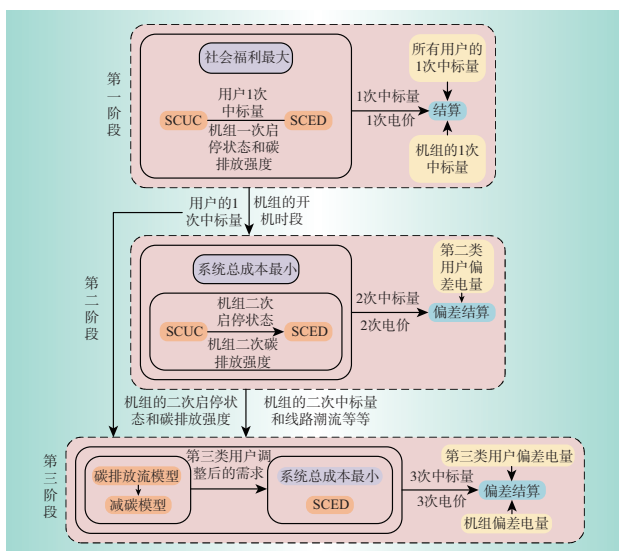


图1 模型出清和结算流程

Fig. 1 Flow of model clearing and settlement

1.1 用户特征分类

根据用户侧的不同需求,将参与报量报价的用户分为3类,所有用户均需要进行第一阶段结算。

第一类用户:无意愿购买第一阶段的未中标电量,该类用户仅需第一阶段结算。

第二类用户:有意愿中标所有日前申报量,该类用户在第一阶段的未中标电量采用第二阶段出清电价结算。

第三类用户:同意需求调整,细分为两小类,分别为在一次中标量和日前申报量的基础上进行需

求调整的用户。该类用户调整后的需求与第一阶段的偏差电量采用第三阶段出清电价结算。同时该类用户需要在日前额外提交调整的最大比例。

1.2 各阶段模型出清和结算

1.2.1 各阶段模型出清和结算流程

(1) 第一阶段出清和结算

通过安全约束机组组合(security constrained unit commitment, SCUC)模型求解得到机组的一次启停状态和碳排放强度以及用户的一次中标量。然后通过安全约束经济调度(security constrained economic dispatch, SCED)模型得到机组的一次中标量和碳排放量以及一次节点边际电价(locational marginal price, LMP)和碳交易成本。最后进行所有用户和机组的结算。此时,若存在第一类用户,则该类用户结算完成。若只存在第一类用户,则机组也结算完成。

(2) 第二阶段出清和结算

边界条件:① 第一阶段已开机机组的时刻和用户的中标量;② 用户中标量值的设置。

第一、二类用户在第二阶段模型的2次中标量值分别为其1次中标量和日前申报量;第三类细分的用户其2次中标量值也分别为其1次中标量和日前申报量。

出清结算:通过第二阶段模型确定机组的2次启停状态、阶梯碳排放强度、中标量和碳排放量,以及2次LMP、碳交易成本和潮流。然后进行偏差结算。此时,第二类用户结算完成。若存在第二类用户而不存在第三类用户,则机组也结算完成。

(3) 第三阶段出清和结算

第三阶段模型包括碳排放流模型^[12]、减碳模型和SCED模型。

边界条件如下。

碳排放流模型的边界条件:前阶段确定的机组中标量、碳排放强度、线路潮流以及用户的中标量。

减碳模型的边界条件:前阶段确定的机组启停状态、碳排放强度以及第三类用户的中标量。

SCED模型的边界条件为:① 前阶段确定的机组启停状态和碳排放强度;② 用户中标量值的设置。

第一、二类用户在SCED模型的3次中标量值分别为其一次中标量和日前申报量;第三类用户的3次中标量值为其调整后的需求。

出清结算:首先通过碳排放流模型计算第三类用户的碳排放强度。并通过该用户的平均碳排放强度筛选其高、低碳排放强度时刻,本文将其简称为高、低碳时刻。接着,通过减碳模型确定第三类用户调整后的需求。然后,通过SCED模型确定机

组的3次中标量和碳排放量,以及3次LMP、碳交易成本。最后,进行第三类用户和机组的偏差结算。

2 考虑用户碳排放强度的电碳耦合日前市场多阶段出清模型

2.1 电碳耦合日前市场第一阶段出清模型

2.1.1 目标函数

第一阶段的SCUC模型考虑用户和机组的报量报价等申报信息,以1 h为时间间隔进行出清,目标函数为社会福利最大,可表示为

$$\max C_D - (C_{\text{energy}} + C_{\text{carbon}}) \quad (1)$$

$$C_D = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_D} \sum_{k=1}^{K_D} b_{i,k}^D P_{i,k,t}^D \quad (2)$$

$$C_{\text{energy}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_G} \sum_{k=1}^{K_G} b_{i,k}^G P_{i,k,t}^G + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_W} \sum_{k=1}^{K_W} b_{i,k}^W P_{i,k,t}^W \quad (3)$$

$$C_{\text{carbon}} = I_{\text{co}} \sum_{t=1}^T E_t^p \quad (4)$$

式中: C_D 为用户购电费用; C_{energy} 为系统发电成本; C_{carbon} 为碳交易成本; T 为总时段数; N_D 、 N_G 、 N_W 分别为用户、传统机组、新能源机组的数量; K_D 、 K_G 、 K_W 分别为用户、传统机组和新能源机组的分段报价段数; $b_{i,k}^D$ 和 $P_{i,k,t}^D$ 分别为节点 i 处用户的第 k 段能量段的报价和时刻 t 的中标量; $b_{i,k}^G$ 和 $P_{i,k,t}^G$ 分别为传统机组 i 的第 k 段能量段的报价和时刻 t 的中标量; $b_{i,k}^W$ 和 $P_{i,k,t}^W$ 分别为新能源机组 i 第 k 段能量段的报价和时刻 t 的中标量; I_{co} 为碳交易价格; E_t^p 为碳交易市场在时刻 t 交易的碳配额总量。

2.1.2 约束条件

(1) 功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^{N_G} P_{i,t}^G + \sum_{i=1}^{N_W} P_{i,t}^W = \sum_{i=1}^{N_D} P_{i,t}^D \quad (5)$$

式中: $P_{i,t}^G$ 为传统机组 i 在时刻 t 的中标总量; $P_{i,t}^W$ 为新能源机组 i 在时刻 t 的中标总量; $P_{i,t}^D$ 为节点 i 处用户在时刻 t 的中标总量。

(2) 碳配额平衡约束

$$\sum_{i=1}^{N_G} e_{i,t} P_{i,t}^G - \alpha \varepsilon \sum_{i=1}^{N_D} P_{i,t}^D - \varphi \sum_{i=1}^{N_W} P_{i,t}^W = E_t^p \quad (6)$$

式中: $e_{i,t}$ 为传统机组 i 在时刻 t 的碳排放强度; ε 为区域碳排放许可因子; α 为免费碳配额分配比例; φ 为新能源机组的国家核证减排量 (China certified emission reduction, CCER) 兑换系数。

(3) 传统机组发电功率和碳排放量约束

$$u_{i,t} P_i^{G,\min} \leq P_{i,t}^G \leq u_{i,t} P_i^{G,\max} \quad (7)$$

$$0 \leq P_{i,k,t}^G \leq P_{i,k,t}^{G,\max} \quad (8)$$

$$e_{i,t} = \sum_{k=1}^{K_G} (e_{i,k,t}^{\text{location}} e_{i,k}) \quad (9)$$

$$\sum_{k=1}^{K_G} e_{i,k,t}^{\text{location}} + (1 - u_{i,t}) = 1 \quad (10)$$

$$\sum_{k=1}^{K_G} e_{i,k,t}^{\text{location}} P_{i,k,t}^G \leq P_{i,t}^G \leq \sum_{k=1}^{K_G} e_{i,k,t}^{\text{location}} P_{i,k,t+1}^G \quad (11)$$

式中: $P_i^{G,\min}$ 、 $P_i^{G,\max}$ 分别为传统机组 i 的最小、最大发电功率; $u_{i,t}$ 为传统机组 i 在时刻 t 的启停状态; $P_{i,k,t}^G$ 和 $P_{i,k,t+1}^{G,\max}$ 分别为传统机组 i 在时刻 t 的第 k 段发电功率和最大功率; $e_{i,k}$ 为传统机组 i 在第 k 段的阶梯碳排放强度常量^[7]; $e_{i,k,t}^{\text{location}}$ 为引入的二进制辅助变量; $P_{i,k,t}^G$ 、 $P_{i,k,t+1}^G$ 分别为传统机组 i 的第 k 个功率分段点的上、下限。

(4) 传统机组爬坡约束

$$P_{i,t}^G - P_{i,t-1}^G \leq R_i^U \quad (12)$$

式中: R_i^U 、 R_i^D 分别为传统机组 i 的上、下坡速率。

$$P_{i,t-1}^G - P_{i,t}^G \leq R_i^D \quad (13)$$

(5) 传统机组启停时间约束

$$\sum_{k=t}^{t+T_{s,i}^G-1} (1 - u_{i,k}) \geq T_{s,i}^G (u_{i,t-1} - u_{i,t}) \quad (14)$$

$$\sum_{k=t}^{t+T_{c,i}^G-1} u_{i,k} \geq T_{c,i}^G (u_{i,t} - u_{i,t-1}) \quad (15)$$

式中: $T_{s,i}^G$ 、 $T_{c,i}^G$ 分别为传统机组 i 的最小开机、停机时间。

(6) 线路潮流约束

$$-l_{\max} \leq \sum_{i \in \Omega_G} G_{l-i} P_{i,t}^G - \sum_{i \in \Omega_D} G_{l-i} P_{i,t}^D \leq l_{\max} \quad (16)$$

式中: $l_{\max}$ 为线路 l 的输电容量上限; G_{l-i} 为机组 i 或用户节点 i 对线路 l 的功率转移分布因子。

(7) 备用容量约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{i,t}^{\text{us}} \leq \min(u_{i,t} P_i^{G,\max} - P_{i,t}^G, R_i^U) \\ 0 \leq P_{i,t}^{\text{ds}} \leq \min(P_{i,t}^G - u_{i,t} P_i^{G,\min}, R_i^D) \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{N_G} P_{i,t}^{\text{us}} \geq r_1 \sum_{i=1}^{N_D} P_{i,t}^{\text{D,Da}} + r_2 \sum_{i=1}^{N_W} P_{i,t}^{\text{W,Da}} \\ \sum_{i=1}^{N_G} P_{i,t}^{\text{ds}} \geq r_1 \sum_{i=1}^{N_D} P_{i,t}^{\text{D,Da}} + r_2 \sum_{i=1}^{N_W} P_{i,t}^{\text{W,Da}} \end{cases} \quad (18)$$

式中: $P_{i,t}^{\text{us}}$ 和 $P_{i,t}^{\text{ds}}$ 分别为传统机组 i 在时刻 t 提供的正、负备用容量; r_1 和 r_2 为用户和新能源的比例系数; $P_{i,t}^{\text{D,Da}}$ 为节点 i 处用户在时刻 t 的日前申报总量; $P_{i,t}^{\text{W,Da}}$ 为新能源机组 i 在时刻 t 的日前申报量。

(8) 新能源机组出力约束

$$0 \leq P_{i,t}^W \leq P_{i,t}^{\text{W,Da}} \quad (19)$$

$$0 \leq P_{i,k,t}^W \leq P_{i,k,t}^{\text{W,max}} \quad (20)$$

式中: $P_{i,k,t}^{\text{W,max}}$ 为新能源机组 i 在时刻 t 第 k 段的最大功率。

(9) 用户中标量约束

$$0 \leq P_{i,t}^D \leq P_{i,t}^{\text{D,Da}} \quad (21)$$

$$0 \leq P_{i,k,t}^D \leq P_{i,k,t}^{\text{D,max}} \quad (22)$$

式中： $P_{i,k,t}^{D,\max}$ 为节点 i 处用户在时刻 t 的第 k 段最大中标量。

第一阶段的 SCUC 模型确定机组的一次启停状态、阶梯碳排放强度和用户的一次中标量,接着 SCED 模型将它们视为已知量,解得机组的一次中标量和碳排放量以及一次 LMP 和碳交易成本。

2.2 电碳耦合日前市场第二阶段出清模型

2.2.1 目标函数

第二阶段的 SCUC 模型仅考虑用户报量,目标函数为系统总成本最小,可表示为

$$\min(C_{\text{energy}} + C_{\text{carbon}}) \quad (23)$$

2.2.2 约束条件

第二阶段 SCUC 模型的约束条件与第一阶段的区别在于:第一阶段模型确定的已开机机组在第二阶段中仍为开机状态;第二阶段模型中节点 i 处用户在时刻 t 的总中标量 $P_{i,t}^D$ 是常量,具体根据用户分类情况确定。

SCED 模型同理,不再重复叙述。

2.3 电碳耦合日前市场第三阶段出清模型

第三阶段模型包括碳排放流模型、减碳模型和 SCED 模型,其中碳排放流模型不再叙述^[12]。

2.3.1 用户需求调整的减碳模型

目标函数可表示为

$$\max \sum_{i \in \Omega_H} \sum_{h \in \Omega_H} CI_{i,h}^D CI_{i,h}^{D,\text{ad}} - \sum_{i \in \Omega_L} \sum_{l \in \Omega_L} CI_{i,l}^D CI_{i,l}^{D,\text{ad}} \quad (24)$$

式中： $CI_{i,h}^D$ 、 $CI_{i,l}^D$ 分别为节点 i 处第三类用户高、低碳时刻的碳排放强度； $CI_{i,h}^{D,\text{ad}}$ 、 $CI_{i,l}^{D,\text{ad}}$ 分别为节点 i 处第三类用户的高、低碳时刻的需求调整量； Ω_H 、 Ω_L 分别为第三类用户的高、低碳时刻合集。

约束条件

(1) 调整量平衡约束

$$\sum_{h \in \Omega_H} CI_{i,h}^{D,\text{ad}} = \sum_{l \in \Omega_L} CI_{i,l}^{D,\text{ad}} \quad (25)$$

该约束保证用户一天的日前申报总量不变。

(2) 调整量约束

$$0 \leq CI_{i,h}^{D,\text{ad}} \leq R_{i,\max}^{D,\text{ad}} P_{i,h}^{D,\text{Da}}, \forall h \in \Omega_H \quad (26)$$

$$0 \leq CI_{i,l}^{D,\text{ad}} \leq R_{i,\max}^{D,\text{ad}} P_{i,l}^{D,\text{Da}}, \forall l \in \Omega_L \quad (27)$$

式中： $R_{i,\max}^{D,\text{ad}}$ 为节点 i 处第三类用户需求调整的最大比例； $P_{i,h}^{D,\text{Da}}$ 、 $P_{i,l}^{D,\text{Da}}$ 分别为节点 i 处第三类用户在高、低碳时刻的日前申报总量。

(3) 各时刻总调整量约束

$$\sum_{i=1}^{N_D} CI_{i,t}^{D,\text{ad}} - \sum_{i=1}^{N_D} CI_{i,t}^{D,\text{ad}} \geq - \sum_{i=1}^{N_G} u_{i,t}^{D,\text{a,b}} R_i^D \quad (28)$$

$$\sum_{i=1}^{N_D} CI_{i,t}^{D,\text{ad}} - \sum_{i=1}^{N_D} CI_{i,t}^{D,\text{ad}} \leq \sum_{i=1}^{N_G} u_{i,t}^{D,\text{a,b}} R_i^U \quad (29)$$

$$\sum_{i=1}^{N_D} CI_{i,t}^{D,\text{ad}} - \sum_{i=1}^{N_D} CI_{i,t}^{D,\text{ad}} \geq \sum_{i=1}^{N_G} u_{i,t}^{D,\text{a,b}} (P_{i,k}^G - P_{i,G,t}^{D,\text{a,b}}) \quad (30)$$

$$\sum_{i=1}^{N_D} CI_{i,t}^{D,\text{ad}} - \sum_{i=1}^{N_D} CI_{i,t}^{D,\text{ad}} \leq \sum_{i=1}^{N_G} u_{i,t}^{D,\text{a,b}} (P_{i,k+1}^G - P_{i,G,t}^{D,\text{a,b}}) \quad (31)$$

式中： $CI_{i,t}^{D,\text{ad}}$ 、 $CI_{i,t}^{D,\text{ad}}$ 分别为时刻 t 的高、低碳排放强度节点 i 处第三类用户的需求调整量； $u_{i,t}^{D,\text{a,b}}$ 为前阶段机组 i 在时刻 t 的启停状态； $P_{i,G,t}^{D,\text{a,b}}$ 为前阶段传统机组 i 在时刻 t 的中标量。

2.3.2 第三阶段的 SCED 模型

第三阶段 SCED 模型与第二阶段区别在于:第三类用户的 $P_{i,t}^D$ 值等于其在时刻 t 调整后的需求。

提出以下的用户减碳分配方法,用户可据此在碳交易市场获利。

$$C_i^{\text{ad}} = \frac{CI_{i,h}^D CI_{i,h}^{D,\text{ad}} - CI_{i,l}^D CI_{i,l}^{D,\text{ad}}}{\sum_{i \in \Omega_H} \sum_{h \in \Omega_H} CI_{i,h}^D CI_{i,h}^{D,\text{ad}} - \sum_{i \in \Omega_L} \sum_{l \in \Omega_L} CI_{i,l}^D CI_{i,l}^{D,\text{ad}}} C_{\text{sys}}^{\text{re}} \quad (32)$$

式中： C_i^{ad} 为节点 i 处第三类用户一天的碳减排量； $C_{\text{sys}}^{\text{re}}$ 为系统一天的碳减排总量。

综上,用户和机组分别有3种结算方式,具体见附录A。

3 算例分析

3.1 算例及参数设置

采用改进的 PJM-5 节点系统^[5]进行仿真分析,如图2所示。在 Matlab 平台采用 Gurobi 求解。

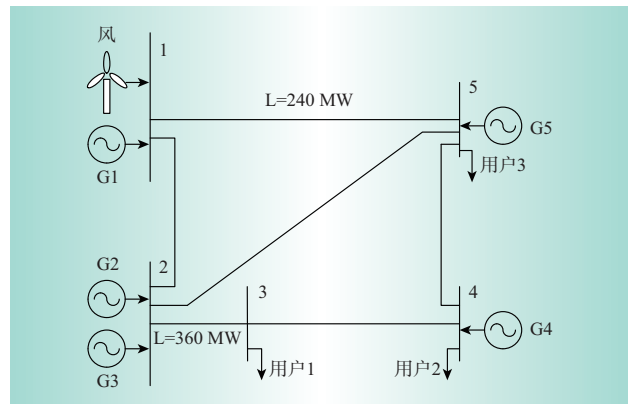


图2 改进的 PJM5 节点系统

Fig. 2 Improved PJM 5-node system

传统机组参数见附录B附表B1。传统机组和用户均采用5段等容量报价形式,新能源机组采用单段报价形式^[6-7];传统机组的阶梯碳排放强度分段数为5； r_1 和 r_2 分别取5%和10%； ε 取设置为0.7 tCO₂/MWh,免费碳配额比例设置为90%^[5];燃煤、燃气机组的燃料成本分别取725元/t、2.3元/m³,机组W的成本为375.75元/MWh,机组W1的CCER分配系数为0.2 t CO₂/MWh,碳价为87元/t^[5]。

传统机组采取边际成本报价^[6]和阶梯碳排放强度形式^[7],24 h的总负荷及风电出力数据参考文献

[5],负荷均匀分布在节点3、节点4和节点5上。

本节设置 M1、M2、M3 和 M4 共 4 个模型进行对比分析。① M1 为考虑用户报量报价的电力现货日前市场单阶段模型;② M2 为电力现货日前市场两阶段出清模型;③ M3 为电碳耦合日前市场两阶段出清模型;④ M4 为考虑用户碳排放强度的电碳耦合日前市场 3 阶段出清模型。

M1 为传统模型,为便于对比分析,假设 M2、M3 中均为第二类用户;M4 中均为第三类中的第二小类用户,且需求调整最大比例均为 3%。

3.2 成本对比分析

各模型的成本如表 1 所示。

表 1 成本对比
Table 1 Cost comparison

模型	传统机组发电成本	风机发电成本	碳交易成本	总成本 万元
M1	350.08	169.14		519.22
M2	791.36	171.79		963.15
M3	792.40	171.79	-15.99	948.20
M4	781.62	171.79	-16.48	936.93

由表 1 可知,在 M1 中,用户中标量偏少,系统总成本最低。

M3 相对于 M2 考虑了碳交易市场,同时由于系统碳排放量少于免费的碳排放量,碳交易成本为负值,系统总成本相比于 M2 减少 14.95 万元。

结合附图 B1 的各模型用户中标量、附图 B2 的用户碳排放强度以及附表 B1 的用户需求调整量可知,在 M4 中,用户的碳排放强度曲线与用户中标量曲线的趋势一致。通过调整用户需求进行减碳,使得高峰期高成本机组中标量减少。同时又减少了碳排放,相对于 M3,系统总成本减少 11.27 万元。

3.3 日前市场结算结果对比分析

3.3.1 节点边际电价对比分析

各模型在节点 4 的电价如图 3 所示。LMP 中下标表示模型编号,上标表示模型阶段。

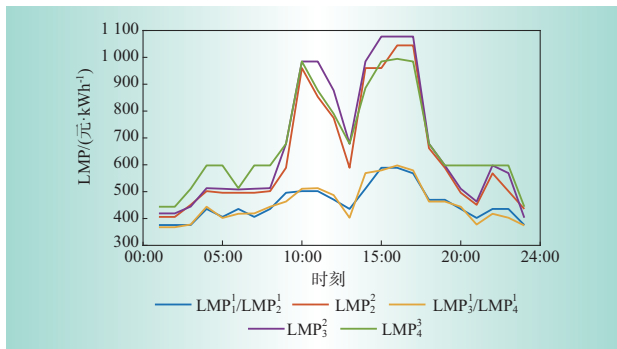


图 3 节点 4 的 LMP
Fig. 3 LMP of node 4

由图 3 可知,在 M1 和 M2、M3、M4 的第一阶段,用户中标量偏低,使得电价较低。同理 M2、M3 的二次电价和 M4 的 3 次电价较高。

M3 考虑了碳市场,边际机组为高碳排放机组,边际碳排放成本为正值,使得第二阶段电价高于 M2^[7]。M4 相对于 M3,高峰需求减少使得高峰电价降低,同理非高峰期电价增加。

3.3.2 用户购电费用对比分析

各模型的用户购电费用如图 4 所示。

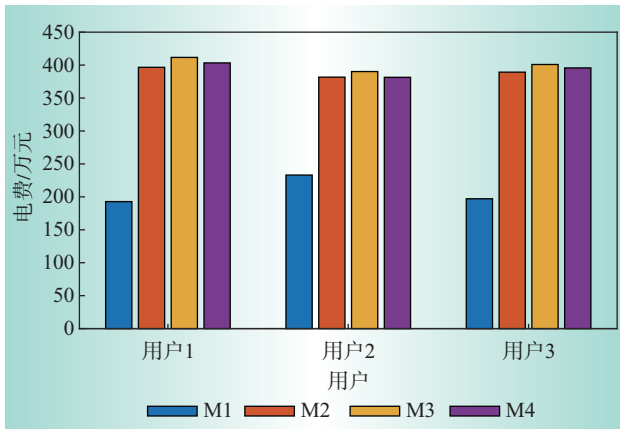


图 4 用户购电费用
Fig. 4 User's electricity purchase cost

可以看出,在 M1 中,用户中标量偏低,导致电价偏低,因此用户的整体购电费用最低。在 M2、M3 和 M4 中,用户以较高的电价购买偏差电量,因此费用高于 M1。M3 考虑了碳成本,电价增加,使得用户购电费用高于 M2。

M4 相对于 M3,用户电费减少,而两者第一阶段的用户电费是一致的,故只需分析第二阶段的费用偏差,结合图 5 简化的第二阶段用户电费进行分析:“ $S_1 + S_2$ ”、“ S_3 ”分别表示 M3 用户的高峰期和非高峰期电费;“ S_1 ”、“ $S_3 + S_4$ ”分别表示 M4 需求调整后用户的高峰期和非高峰期电费。“ $S_1 + S_2 + S_3$ ”、“ $S_1 + S_3 + S_4$ ”分别表示 M3、M4 的第二阶段电费。因为需求调整幅度较小,M4 高峰期电价 Pr_h^4 小于 Pr_h^3 ,非高峰期电价 Pr_l^4 大于 Pr_l^3 ,其中 ΔP 表示需求调整总量(高峰期减少量/非高峰期增加量)。同时可知 $Pr_l^4 < Pr_h^3$,使得 M4 用户非高峰期增加的电费 S_4 小于高峰期减少的电费 S_2 ,即 M4 用户高峰期减少的电费大于其非高峰增加的电费。同时 M4 用户还可以获得减碳收益,因此用户电费减少,增强用户参与减碳需求调整的积极性。图 5 为第二阶段的用户电费。

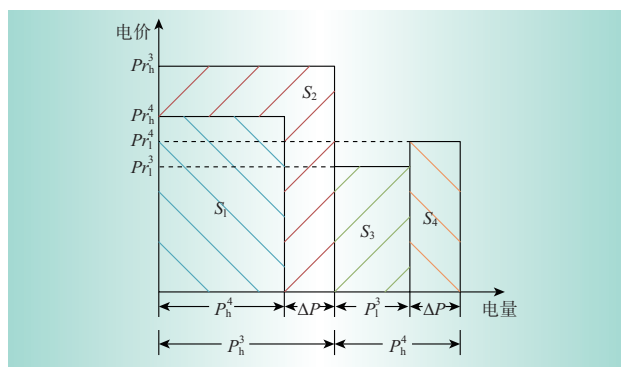


图5 第二阶段的用户电费

Fig. 5 User's electricity fee in the second stage

4 结束语

为灵活满足用户需求和促进电碳市场深度耦合,构建了日前市场多阶段出清模型,分析得到如下结论:

(1) 通过满足用户需求提升了系统灵活性,提高了资源利用率;

(2) 通过调整用户需求,重新优化机组出力和出清电价,不仅减少了系统成本和碳排放成本;同时减少了用户购电费用和峰谷差。

后续工作将关注以下内容。

发用两侧报价策略优化方法:在保证一定中标量的基础上确定最优报价,实现自身效益最大化;

日前-实时市场联合的电碳耦合机制:探索市场间的协同效应,进一步保证经济型和低碳性。D

附录见本刊网络版(<http://dsm.ijournals.cn>)。

参考文献:

- [1] 杜帅,丰玉帆.考虑系统性风险的现货市场双边报价交易机制与模型[J].电力需求侧管理,2023,25(1):12-19. DU Shuai, FENG Yufan. Bilateral quotation trading mechanism and model in spot market considering systemic risk [J]. Power Demand Side Management, 2023, 25(1):12-19.
- [2] 中国储能网.建设电力现货市场,全国最大省级电网办法多![EB/OL].(2019-06-12)[2024-07-09].<https://www.escn.com.cn/news/show-741228.html>. China Energy Storage Network. Building a spot market for electricity, the country's largest provincial power grid with many approaches [EB/OL]. (2019-06-12) [2024-07-09]. <https://www.escn.com.cn/news/show-741228.html>.
- [3] 甘肃省人民政府.全国唯一一家用户“报量报价”参与的电力现货市场——甘肃电力现货市场正式运行[EB/OL].(2024-09-07)[2024-09-21].<https://www.gansu.gov.cn/gsszf/c100002/c100006/c100007/202409/173983809.shtml>. The People's Government of Gansu Province. The nation's only power spot market in which users "report quantity and offer" participation—gansu power spot

market official operation [EB/OL]. (2024-09-07) [2024-09-21]. <https://www.gansu.gov.cn/gsszf/c100002/c100006/c100007/202409/173983809.shtml>.

- [4] 唐尧,杨争林,郑亚先,等.发电负荷双侧报价的日前电能市场出清模型及其定价分析[J].电力建设,2021,42(7):90-100. TANG Yao, YANG Zhenglin, ZHENG Yaxian, et al. Clearing model and pricing analysis of day-ahead electricity market considering double-side auction [J]. Electric Power Construction, 2021, 42(7):90-100.
- [5] 叶晨,牟玉亭,王蓓蓓,等.考虑动态碳交易曲线的电-碳市场出清模型及节点边际电价构成机理分析[J].电网技术,2023,47(2):613-624. YE Chen, MOU Yuting, WANG Beibei, et al. Mechanism of locational marginal prices and clearing model of electricity and carbon market considering dynamic carbon trading curve [J]. Power System Technology, 2023, 47(2):613-624.
- [6] 董福贵,郗来昊,孟子航.考虑碳交易的电力现货市场出清多阶段优化模型研究[J].电网技术,2024,48(1):79-96. DONG Fugui, XI Laihao, MENG Zihang. A multi-stage optimization model for electricity spot market clearing considering carbon trading [J]. Power System Technology, 2024, 48(1):79-96.
- [7] 崔杨,徐扬,刘新元,等.碳交易耦合下现货电能量市场日前出清方法[J].中国电机工程学报,2025,45(1):66-80. CUI Yang, XU Yang, LIU Xinyuan, et al. Day-ahead clearing method of spot electricity energy market under carbon trading coupling [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(1):66-80.
- [8] 吴争,甘海庆.电力市场环境需求侧资源评估与调控综述[J].电力需求侧管理,2024,26(1):1-8. WU Zheng, GAN Haiqing. Review of research on the assessment and regulation of the demand side resources under electricity market circumstances [J]. Power Demand Side Management, 2024, 26(1):1-8.
- [9] 李姚旺,张宁,杜尔顺,等.基于碳排放流的电力系统低碳需求响应机制研究及效益分析[J].中国电机工程学报,2022,42(8):2830-2842. LI Yaowang, ZHANG Ning, DU Ershun, et al. Mechanism study and benefit analysis on power system low carbon demand response based on carbon emission flow [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8):2830-2842.
- [10] 田壁源,刘倩汝,戚红艳,等.阶梯分时碳价下考虑能流-碳流耦合的综合能源园区优化调度[J].电力需求侧管理,2024,26(6):37-43. TIAN Biyuan, LIU Qianru, QI Hongyan, et al. Optimal dispatch of PIES considering energy carbon flow coupling under carbon trading mechanism [J]. Power Demand Side Management, 2024, 26(6):37-43.
- [11] WANG Y Q, QIU J, TAO Y C, et al. Carbon-oriented operational planning in coupled electricity and emission trading markets [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(4):3145-3157.
- [12] KANG C Q, ZHOU T R, CHEN Q X, et al. Carbon emission flow from generation to demand: a network-based model [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(5):2386-2394.

(责任编辑 方德康)