

# 基于碳排放流的电力系统低碳经济优化模型

张 艺, 王 欣, 胡 伟

(上海电力大学 经济与管理学院, 上海 200090)

**摘要:** 针对电力系统存在碳计量方案与用户电力交易关联度不高、碳排放责任与用户用电行为协同性较差等问题, 提出基于碳排放流的电力系统低碳经济优化模型。首先, 利用碳排放流理论, 精准计算电力用户节点之间动态负荷碳势, 深度融合负荷碳势与用户用电行为的关联关系, 有效提升节点用电行为的低碳调控能力; 其次, 结合阶梯电价制定原则, 提出基于 Shapley 值的碳责任分摊方法, 推导每个节点用户的碳配额, 使各用户节点碳排放责任区间更加合理; 然后, 将系统减排量最高以及节点碳成本最低作为目标函数, 建立系统低碳经济优化模型, 提出针对优化结果的效益分析方案; 最后, 算例分析表明, 所提出的模型在满足电力系统低碳要求的同时, 达到优化用户用电行为的积极效果, 实现了系统降碳和改善用电的双向约束, 为电力系统低碳经济运行提供了一种切实可行的方案。

**关键词:** 碳排放流; 电力系统; 低碳经济优化; 需求响应; 碳配额

中图分类号: TM 73 文献标志码: A

## Low carbon economic optimization model of power system based on carbon emission flow

ZHANG Yi, WANG Xin, HU Wei

(School of Economics and Management, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of low correlation between carbon metering scheme and users' electricity transaction, and poor coordination between carbon emission responsibility and users' electricity consumption behavior in power system, a low carbon economy optimization model of power system based on carbon emission flow was proposed. First of all, the carbon emission flow theory was used to accurately calculate the dynamic load carbon potential between power user nodes, and deeply integrated the relationship between load carbon potential and user behavior, so as to effectively

收稿日期: 2023-12-03

基金项目: 国家社会科学基金资助项目(19BGL003)

第一作者: 张 艺(1979-), 男, 教授。研究方向: 能源系统优化决策、电力工程管理。E-mail: zhangyish@126.com

引文格式: 张艺, 王欣, 胡伟. 基于碳排放流的电力系统低碳经济优化模型[J]. 上海理工大学学报, 2025, 47(1): 68-78.

Citation: ZHANG Yi, WANG Xin, HU Wei. Low carbon economic optimization model of power system based on carbon emission flow[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2025, 47(1): 68-78.

improved the low carbon regulation ability of node power consumption behavior. Secondly, the carbon responsibility sharing method of each user node was put forward by using Shapley method, and the carbon quota of each user node was deduced, combined with the principle of ladder electricity price, which made the carbon emission responsibility interval of each user node more reasonable. Thirdly, the highest emission reduction of the system and the lowest carbon cost of the node were selected as the objective function to establish the low carbon economy optimization model of the system, and the benefit analysis scheme for the optimization results was put forward. Finally, the analysis of the example shows that the proposed model not only meets the goal of low carbon demand of the power system, but also achieves the positive effect of optimizing the electricity consumption behavior of users, and realizes the two-way constraint of reducing carbon and improving electricity consumption of the system. It provides a feasible scheme for low carbon economic operation of power system.

**Keywords:** carbon emission flow; electric power system; optimization of low carbon economy; demand response; carbon quota

随着国家环境问题日益严峻,我国提出“2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和”的“双碳”目标,并相继发布了碳达峰、碳中和的行动方案<sup>[1]</sup>。碳排放的主要来源是能源领域,而电力行业又占能源领域总碳排放的44%以上<sup>[2]</sup>。因此,如何实现电力行业的低碳发展已经成为当前研究的热点问题。

随着电力行业迫切的低碳转型需求,国内外学者主要从电力系统低碳优化调度以及场景运用着手,开展研究。在电力系统低碳优化调度领域, Yang等<sup>[3]</sup>考虑配电网中的主网受电及用户特性,提出配电网低碳指标,提出一种考虑配电网碳排放和需求响应的低碳调度模型,可有效减少配电网的碳排放,增加配电网光伏消纳。赵伟等<sup>[4]</sup>在需求响应机制的作用下,将碳排放责任归算到用户侧,结合需求侧阶梯碳价,提出考虑碳排放责任分摊和需求侧主动响应的电力系统双层线性规划模型。姜海洋等<sup>[5]</sup>将碳税机制纳入经济调度,提出了结合碳捕获和储存技术以及风电不确定性的低碳优化调度模型。上述研究为减少电力系统碳排放提供了可行的解决思路,为电力系统低碳转型、增加新能源消纳提供理论参考。

发展低碳电力,需要有效降低碳排放量,如何量化评估碳排放是电力行业低碳转型的关键问题。精细评估碳排放流对于制定相应政策、开展关键性研究都具有重要意义。电力行业传统评估碳排方法为宏观统计法,即通过机组运行时间和碳排强度来粗略计算发电机组的总碳排放量。考

虑到电力系统宏观统计法侧重发电侧碳排放量,无法明确用电侧的碳排放责任,有学者提出碳流<sup>[6]</sup>的概念。碳排放流<sup>[7]</sup>与电力潮流联系紧密,且时间尺度广泛,还可合理量化分摊电力交换后的碳排放责任。在电力系统低碳研究中,已有不少学者将碳排放流引入低碳运行优化模型。Dai等<sup>[8]</sup>在碳排放流计算模型的基础上,将碳税作为需求响应信号,构建新型电力系统双层低碳优化调度模型,实现了新型电力系统低碳优化调度。Pan等<sup>[9]</sup>从时空维度,感知节点碳势变化,结合碳流分析负荷需求响应,构建基于节点碳势需求响应的电力系统双层优化调度模型。Zhang等<sup>[10]</sup>提出考虑气网动态特性的天然气碳流计算方法,构建源荷互动两阶段低碳经济调度模型,有效解决弃风、碳排较高的问题。碳排放流理论的提出为碳排放量计算提供了更加精确的模型,并且明确用户侧的碳排放责任。

在政策方面,碳交易机制对优化电力系统资源配置、促进节能降碳有着重要意义。碳交易机制作为兼顾降低碳排和提高效益的有效手段,从市场角度引导电力系统低碳运行,通过买卖碳排放权实现对碳排放企业的奖惩。Li等<sup>[11]</sup>从碳交易机制实施的视角分析电力部门碳排放驱动因素,研究结果表明,碳交易机制通过促进发电和用电效率来加速电力部门脱碳过程。Sun等<sup>[12]</sup>以碳为主导进行定价,建立了园区和用户的上下层博弈模型,以及园区与园区间的纳什议价模型,形成双重博弈机制,最后采用二阶段鲁棒优化结合自

适应交替方向乘子法求解。Jiao等<sup>[13]</sup>从工业用户角度出发,考虑在阶梯式碳交易机制下,分别设置内外部优化目标,建立了用户参与综合需求响应的混合整数非线性优化模型。Liang等<sup>[14]</sup>考虑了可再生能源和负荷的多重不确定性,结合阶梯式碳交易机制建立了多目标优化调度模型。以上方法优化了电力资源调度,同时提高了用户积极性,为碳交易中用户获得效益提供视角,给予研究者减碳新思路,因此,有必要研究碳交易下的电力系统低碳运行机制。

需要特别注意的是,大多数学者着重考虑碳交易机制下电价对用户用电行为的影响<sup>[15]</sup>,从“源侧”出发建立低碳优化调度模型,以平衡协调源荷两侧<sup>[10]</sup>,最终实现电力系统低碳运行。因此,应结合低碳调度和效益评估,顺应电力系统“源随荷动”的特性,拓展研究视角,以完善面向用户需求的低碳调度方案,进而实现电力系统的低碳经济发展。电力系统碳排放流理论<sup>[9]</sup>从用户角度出发,将用电碳排放量与消纳电量来源进行深度融合,将各个电力潮流贴上碳标签<sup>[16]</sup>,实现电力碳排放的可追溯性。“碳标签化”的溯源方式<sup>[17]</sup>使得碳排放因子具有时间伴随性,从而影响用户的日内用电行为和碳市场参与度,进而实现负荷曲线与碳市场交易方案的紧密契合,这对分析电力系统的低碳经济运行具有重要意义。

此外,碳排放责任的分摊也是电力系统低碳优化的重要内容,明确各主体碳排放责任,才能准确计算各主体碳排放成本,合理制定低碳优化目标。电力系统碳排放量受多主体用电行为的影响,因此,应由各用户共同承担碳排放责任,可抽象等效为合作博弈模型。相比于传统比例分摊,应用合作博弈经典分摊方法如Shapely值法<sup>[18]</sup>,可准确衡量各个主体的贡献,较为公平合理地分摊碳排放责任。王硕等<sup>[19]</sup>以负荷落点区域作为研究对象,结合碳排放因子测算减排量,利用Shapely值计算减碳效益。Zhang等<sup>[20]</sup>在电气综合能源系统框架下,引入Shapely值,建立了综合能源系统双层调度模型,有效提高了能源利用率,明显降低了运行成本和碳排放量。

综合上述分析,结合碳交易机制下的碳效益评估和用电用户需求,本文提出基于碳排放流的电力系统低碳经济优化模型。依据碳排放流理论,提出动态负荷碳势概念,增强用户用电行为

与碳排计算的关联性。采用Shapley值的碳责任分摊方案,计算用户节点的碳配额分配合理区间,提高用户节点参与碳市场积极性。利用碳责任分摊范围,确定阶梯型碳价,实现用户节点用电行为的经济调度。以碳减排最大以及碳成本最小为目标,建立电力系统低碳经济优化模型,量化分析优化模型的低碳经济效益,实现电力系统低碳经济运行。

## 1 低碳经济兼容需求响应机制

现有研究需求响应机制视角大多都是处于“电视角”<sup>[21]</sup>,其主要是通过调节峰谷时段的电价差额以及相应的经济激励,使用户节点受到经济驱使而改变其用电方式,进而实现用电效用最大化的目标。而在“碳视角”下,不仅可保证用户的基本用电需求,而且也可稳步推进国家的“双碳”目标。低碳经济需求响应主要利用电力用户用电行为下的碳排放信息,将其与碳市场相结合,从而保障电力系统中用户的用电需求和可再生能源的高消纳率。

在低碳经济兼容需求响应中,运用负荷侧碳势来表征电力系统用户用电产生碳排的信息差异。负荷侧碳势主要反映了用电节点使用电量所对应的电源侧的直接碳排放量,该指标可以直观地体现用户节点的用电低碳特性。因此,本文运用负荷碳势指标,调整用户参与碳市场的碳价,使其与负荷碳势的曲线成反方向趋势变动,进而形成经济激励,驱使节点用户调整自身用电计划,实现低碳电力的目标。在此基础上,将用户的用电优化行为与碳交易相结合,先对节点碳配额进行合理分配,然后计算用户的碳减排量以及碳收益。低碳经济兼容需求响应的减排机制思路如图1所示。

低碳经济兼容需求响应机制具体步骤如下:

**步骤1** 获取用户动态负荷碳势。负荷节点碳势与该节点相连接支路的碳流密度有关,而支路的碳流密度与源端组合种类以及对应的碳排放信息有关。本文在参考碳排放流理论的基础上,完成用户动态负荷碳势的计算,并运用碳表装置将其展示给用电节点,将数据可视化。

**步骤2** 获取响应前负荷曲线。用户在低碳经济兼容需求响应前的原始消耗量需要被记录,将

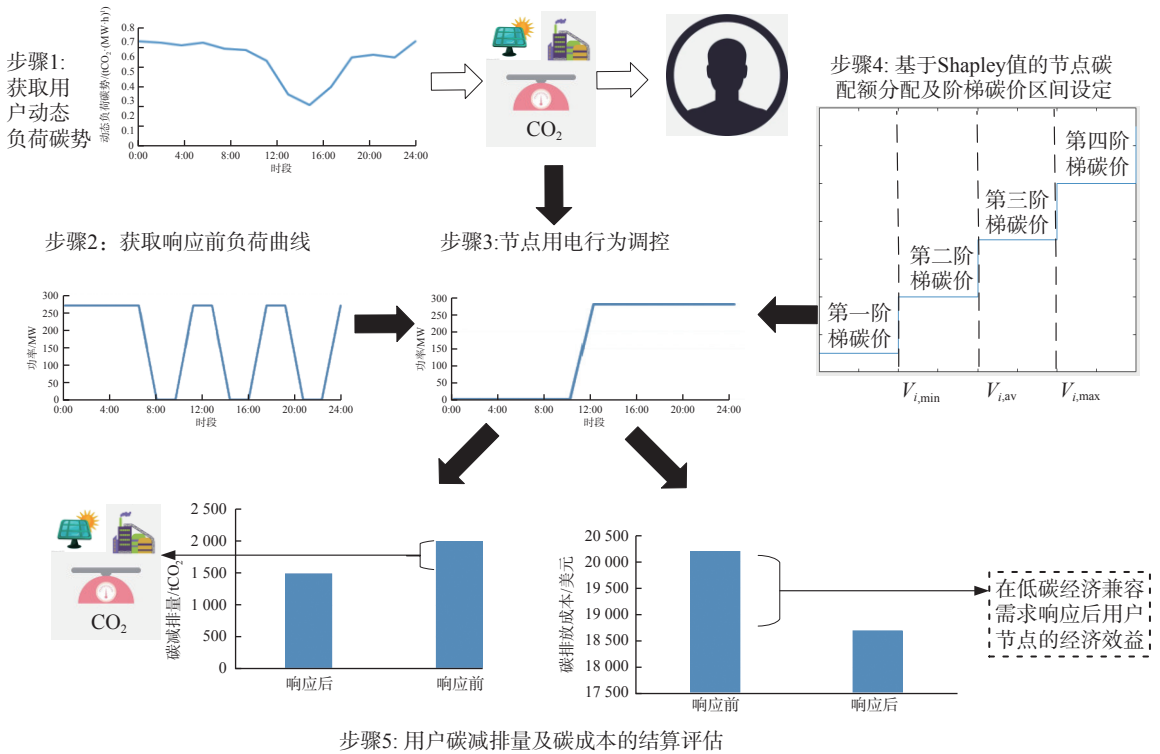


图1 低碳经济兼容需求响应机制思路图

Fig.1 Idea diagram of compatible demand response mechanism for low carbon economy

其与步骤1中的用户动态负荷碳势相结合,即可得到用户节点需求响应前间接碳排放量,为后续的低碳效果评估做数据支撑。

**步骤3** 节点用电行为调控。用户在碳表装置给出动态负荷碳势数据后,根据不同时段碳势的差异性,用户节点可将碳势较高时段的用电负荷转移到碳势较低的时段,自行调整用电计划。在满足用户当日基本用电需求不变的情况下,实现碳排放量的降低。在减排的同时,用电用户可将多余的碳配额出售,不仅可提高自身经济效益,也能增强碳交易市场的活跃度。

**步骤4** 基于Shapley值的节点碳配额分配及阶梯碳价区间设定。在用户优化自身用电行为后,可依据碳排放流理论将碳排放量在负荷侧进行归算。考虑到碳排放流理论的特性会导致节点的碳排放责任分配不均,本文引入Shapley值来完成用户节点碳配额的合理分配。同时,本文提出一种阶梯碳价设定模式,激励用电节点优化自身用电行为,由此降低自身碳排放量,使其能够参与到更高碳价的交易中,达到经济效益最大化的目标。具体设定模型及公式见后文。

**步骤5** 用户碳减排量及碳成本的结算评估。

在用户优化自身用电行为后,得到当日实际动态负荷碳势和用电负荷曲线,由此完成实际节点的碳排放量计算。在此基础上,将该碳排放量与步骤1和2得到的原始间接碳排放量进行比较,即可计算出用户的碳减排量,完成节点的低碳需求响应评估结果。根据步骤4的阶梯碳价模式,计算节点的总排放成本,完成节点经济需求响应评估。

传统的需求响应机制通过电价的形式影响用户的用电行为,而本文提出的低碳经济兼容需求响应机制采取动态负荷碳势影响节点的用电行为。采用动态负荷碳势的原因主要有:a.一方面,新型电力系统的可再生能源占比越来越高;另一方面,新能源的波动性和不确定性较强,单纯采用定碳排放因子的方法计算无法满足新型能源发电的时效性。b.“碳视角”下,节点不仅要考虑电力需求,还需要考虑碳收益。本文提出的动态负荷碳势可以实时引导用户节点的减排行为,使得用户将高碳势时段的负荷转移到低碳势时段,由此可将剩余的碳配额出售给碳配额不足的用户,达到提高经济效益的目的。综合以上两个方面,动态负荷碳势可以很好地促进低碳经济

兼容需求响应机制的落地实施。

## 2 基于 Shapley 值的碳配额分配及区间碳价设定方案

本文采用碳排放流法,将源侧的直接碳排放量转移到用户节点的间接碳排放量中。然而,电力系统中的用户节点存在位置分布复杂、网络损耗及消耗电能种类多变等因素,使得用户节点的碳配额承担量计算难度加大。因此,如何制定合理的碳配额分摊方案是低碳响应需求机制的关键内容。本文借鉴 Shapley 值理论<sup>[18]</sup>,将用户节点的碳排放责任进行合理分摊,进而得到负荷节点的碳排放区间。在此基础上,需求响应机制还兼容低碳与经济两方面的需求。从“碳角度”出发,阶梯式调整用户参与碳市场的碳价,使用户受到经济效益驱使而提高低碳势时段的用电需求。因此,可利用得到的负荷节点碳排区间,设定阶梯式碳价方案,最终完成用户负荷侧碳排放成本的计算。

### 2.1 基于碳排放流理论的动态负荷碳势计算方法

在整个电力系统中,用户用电的碳排放源头与所消纳的电源种类密切相关,而碳排放流理论可以全面地溯源用户负荷的碳排放量。碳排放流理论将每一个支路的有功功率贴上碳标签,使得用户的碳排放量有迹可循。根据源侧节点发电信息、所分支路功率信息、网损信息以及负荷节点链接支路信息等将发电侧碳排放量分摊给电网侧和用户侧,由此厘清用户碳排放详细源头以及所耗电量复合种类。此外,碳排放流的溯源特点具有实时性,使其成为计算动态负荷碳势的关键方法。以下简述碳排放流理论及动态负荷碳势的计算流程。

#### 2.1.1 碳流率

碳流率(carbon emission flow rate, CEFR)表示单位时段内通过电力系统节点以及支路所对应的碳排放量,单位是 $tCO_2/h$ ,计算公式<sup>[7]</sup>如下所示:

$$R = \frac{dF}{dt} \quad (1)$$

式中: $F$ 为流入节点或者流过支路的碳排放量; $t$ 为时间。

#### 2.1.2 动态负荷碳势

动态负荷碳势是由碳流密度(carbon intensity,

CI)演变而来,碳流密度与碳排放因子的物理意义相同,都是单位电量的碳排放量,包括源端电机碳排放强度、支路碳流密度以及节点碳势3个概念,单位为 $tCO_2/(MW \cdot h)$ 。本文研究的动态负荷碳势具有实时性,因此,将节点碳势的概念与时间段相结合,使用户可以获取依据时间变化的碳势变化曲线。

动态负荷碳势(dynamic load carbon intensity, DLCI)表示用户节点在 $t$ 时段消费单位电量所产生的相当于源侧产生的碳排放量,用 $e_{i,t}$ 表示,数值上等于所有流入该用户节点支路碳流密度有关有功功率的加权平均。计算公式如下

$$e_{i,t} = \frac{\sum_{j=1}^J P_{j,t} \alpha_{j,t} + P_{Gi,t} e_{Gi}}{\sum_{j=1}^J P_{j,t} + P_{Gi,t}} \quad (2)$$

式中: $P_{j,t}$ 为支路 $j$ 在时段 $t$ 的注入节点 $i$ 的电量; $\alpha_{j,t}$ 为注入节点支路 $j$ 的碳流密度; $J$ 为向该用户节点注入功率的支路数; $P_{Gi,t}$ 为用户节点 $i$ 处的发电机的输入功率; $e_{Gi,t}$ 为该发电机的碳排放强度值。支路的碳流密度计算方法<sup>[7]</sup>如下所示:

$$\alpha = \frac{R}{P} \quad (3)$$

式中, $P$ 为支路对应的有功潮流。支路的碳流密度与该支路始端节点的碳势相等。

基于动态负荷碳势,可以计算用户节点在时段 $t$ 的用电碳排放量,为低碳经济兼容效益评估提供理论支撑,具体计算公式如下

$$E_{i,t} = e_{i,t} Q_{i,t} \quad (4)$$

式中: $Q_{i,t}$ 为用户节点 $i$ 在时段 $t$ 的用电量; $E_{i,t}$ 为用户节点 $i$ 在时段 $t$ 的实际碳排放量。

在低碳经济兼容需求响应机制下,节点的未来、实时以及过去的动态节点碳势都可以计算得到。对于节点未来的动态节点碳势的计算,可以根据日前调度数据得到24h内的潮流分布结果。在此基础上,结合源侧的碳排放信息,计算得到节点未来24h的间接碳排放量曲线。根据机组的碳排放情况,以及电力系统不同时间潮流的出力情况,计算得到用户节点实时以及过去的动态碳排放因子曲线。

### 2.2 基于 Shapley 值的碳配额分配理论

2017年,中国面向多个城市开启全国碳排放

交易市场, 而碳交易机制主要包含碳交易价格、碳配额以及碳排放量 3 部分。碳排放配额的合理分配是用户参与碳交易市场的关键动力之一。Zhou 等<sup>[22]</sup> 利用 Shapley 值法, 将其与电力系统碳配额分配方案进行深度融合, 很好地解决了用户节点碳责任计算难度大的问题。因此, 本文将该方法引入到低碳经济需求响应机制中, 以每个电力用户为主体进行研究, 计算各主体的碳配额量, 制定合理的碳配额分配方案, 使碳市场的活力得到进一步的提升。

Shapley 值法是一种用于解决多人合作博弈问题的数学方法, 它的优点就是将收益按成员的边际贡献进行分摊, 参与者获得的收益等于他对联盟边际贡献的平均值<sup>[23-24]</sup>。对于本文所提出的碳配额分配理论, 应用 Shapley 值法分摊用户节点的碳排放责任, 具体的计算规则如下:

$$V_i = \sum_{i \in S} \omega(|S|)[V(S) - V(S/i)] \quad (5)$$

$$\omega(|S|) = \frac{(n-|S|)! (|S|-1)!}{n!} \quad (6)$$

式中:  $V_i$  为联盟中用户节点  $i$  碳配额分配值;  $S$  为子联盟;  $|S|$  为子联盟的数量;  $\omega(|S|)$  为加权因子;  $n$  为总联盟用户节点数量;  $V(S)$  为集合  $S$  需要承担的碳排放责任;  $V(S/i)$  为集合  $S$  中除去节点  $i$  的其他用户节点形成联盟的碳责任承担量。用户节点的碳责任承担值应该在边际作用的范围内, 不应

$$C_{c,i,t} = \begin{cases} p_1 E_{i,t}, & 0 \leq E_{i,t} < V_{i,\min} \\ p_2 (E_{i,t} - V_i), & V_{i,\min} \leq E_{i,t} < V_{i,\text{av}} \\ p_3 (E_{i,t} - V_{i,\text{av}}) + p_2 (V_{i,\text{av}} - V_i), & V_{i,\min} \leq V_i < V_{i,\text{av}} \leq E_{i,t} < V_{i,\max} \\ p_3 (E_{i,t} - V_i), & V_{i,\text{av}} \leq V_i < E_{i,t} < V_{i,\max} \\ p_3 (V_{i,\max} - V_i) + p_4 (E_{i,t} - V_{i,\max}), & V_{i,\text{av}} \leq V_i < V_{i,\max} \leq E_{i,t} \\ p_4 (E_{i,t} - V_{i,\max}), & V_{i,\max} \leq V_i < E_{i,t} \end{cases} \quad (9)$$

本章引用 Shapley 值理论, 对用户节点进行合理的碳配额分摊, 在此基础上, 设定阶梯区间碳价, 使得高排放用户节点的碳成本更高, 以此激励用户节点向低碳电力的需求发展, 同时增加余碳配额节点的概率, 提高了碳交易市场的活性。

### 3 低碳经济兼容效益评估模型

本文提出的低碳经济兼容需求响应机制通过优化节点的用电行为, 降低系统的总体碳排放量, 对整个电力系统产生影响。在此基础上, 用

该小于边际作用的最小值  $V_{i,\min}$ , 也不应该大于边际作用的最大值  $V_{i,\max}$ , 即

$$V_{i,\min} \leq V_i \leq V_{i,\max} \quad (7)$$

#### 2.3 阶梯区间碳价设定方案

为设定合理的阶梯式碳价, 基于 Shapley 值的碳配额分配理论的碳配额分配范围, 将碳配额边际区间内的平均值  $V_{i,\text{av}}$  作为一个阶段的节点, 在  $V_{i,\min}$ 、 $V_{i,\text{av}}$ 、 $V_{i,\max}$  范围内设定阶梯区间碳价方案。4 个碳价设定区间分别为: 无成本价格区间  $0 \sim V_{i,\min}$ 、低成本价格区间  $V_{i,\min} \sim V_{i,\text{av}}$ 、中成本价格区间  $V_{i,\text{av}} \sim V_{i,\max}$ 、高成本价格区间  $V_{i,\max} \sim \infty$ 。针对不同的区间, 对碳价实施阶段性的设定, 设定方式如下所示:

$$p = \begin{cases} p_1, & 0 \leq E_{i,t} < V_{i,\min} \\ p_2, & V_{i,\min} \leq E_{i,t} < V_{i,\text{av}} \\ p_3, & V_{i,\text{av}} \leq E_{i,t} < V_{i,\max} \\ p_4, & E_{i,t} \geq V_{i,\max} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $p$  为阶梯碳价, 单位为美元/tCO<sub>2</sub>。当用户的碳排放量低于边际值时, 节点处于余碳配额的状态, 不需要从碳市场购入碳配额, 因此,  $p_1 = 0$ ;  $E_{i,t}$  为用户节点  $i$  在时段  $t$  的碳排放量。

根据以上的阶梯碳价区间的设定计算节点的碳排放总成本。为了便于计算, 本文假设电力系统中采取免费碳配额分配机制, 具体碳成本计算方程如下所示:

户将多余的碳配额出售以获取经济收益, 实现活跃碳市场的目标。因此, 对于整个电网企业来说, 低碳经济兼容需求响应机制可以促进可再生能源的消耗, 降低整个电力系统的碳排放水平。对于用户节点来说, 不仅可增强低碳意识, 而且可提高经济水平。

本文将分别从系统和用户角度出发, 评估该需求响应机制的低碳经济效用。低碳经济兼容效益评估步骤如图 2 所示。

**步骤 1** 获取系统以年为单位的逐小时能量流数据。随着电力系统中新能源占比的提高, 传统

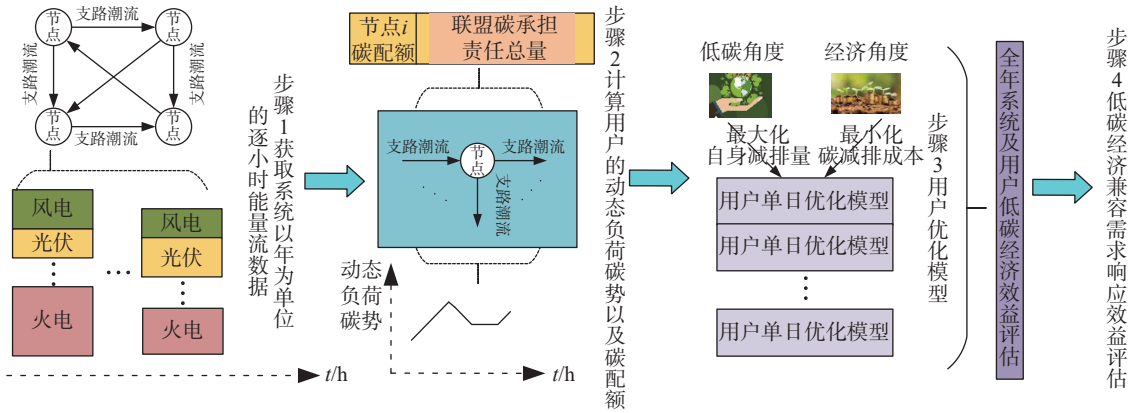


图2 低碳经济兼容效益评估流程图

Fig.2 Flow chart of low carbon economy compatibility benefit evaluation

的基于持续负荷曲线的系统运行模拟方式无法全面考虑新能源的波动性和不确定性,进而无法合理设定相关机组约束,故不适用于综合能源系统运行的场景。因此,本文利用全景时序运行模拟技术,获取系统全年8760h的能量流数据。具体的运行模拟模型见文献[7],该模型包括风电、光伏、电网、储能以及常规火电的调度运行约束,通过简化的电力系统机组组合模型,实现对系统运行状态以及时序全阶段的精确模拟。

**步骤2** 计算用户的动态负荷碳势以及碳配额。利用碳排放流理论,将碳势概念进行改进,引申出动态负荷碳势的计算方法。通过获取用户历史能量流数据以及电力系统出力机组的碳排放信息,依据基于碳排放流理论的动态负荷碳势计算流程,得到用户逐小时的动态负荷碳势曲线。同时,利用基于Shapley值的碳排放责任分配原则,得到节点的碳配额数据,为后续用户用电行为优化提供数据支撑。

**步骤3** 构建用户优化模型。本文假设用户的动态负荷碳势数据和碳配额分配结果提前一天发布给节点用户,用户每天都要对自身用电行为进行调整。基于低碳意识,考虑碳交易经济性,在感知到一天内动态负荷碳势的不同后,用户会在调节能力允许范围内以最大化减排量、最小化碳成本作为目标进行需求响应。首先,用户单日最小碳成本基于式(10)计算得到,公式如下:

$$C_{CO_2,D} = \sum_{i=1}^I \sum_{t \in T_D} C_{c,i,t} \quad (10)$$

式中:  $C_{CO_2,D}$ 为用户单日碳排放成本;  $T_D$ 为单日总时段;  $I$ 为联盟内用户  $i$  的总数。

此外,最大化碳排放量的目标函数以及约束

条件见式(11)~(15)。其中:式(11)为模型的目标函数;式(12)~(16)为约束条件。

$$\max \Delta E_{CO_2,D} = \sum_{i=1}^I \sum_{t \in T_D} (q_{b,i,t} - q_{a,i,t}) \Delta t e_{i,t} \quad (11)$$

式中:  $\Delta E_{CO_2,D}$ 为用户节点的单日碳减排量;  $\Delta t$ 为1h单位段;  $q_{b,i,t}$ 和  $q_{a,i,t}$ 分别为用户优化前和优化后的负荷量。

$$\begin{cases} 0 \leq |q_{b,i,t} - q_{a,i,t}| \leq \Delta Q_{\max} & (12) \\ q_{a,i,t} I[(q_{b,i,t} - q_{a,i,t}) < 0] \leq Q_{\max} & (13) \\ (q_{b,i,t} - q_{a,i,t}) I[(q_{b,i,t} - q_{a,i,t}) \geq 0] \leq Q_{L,t} & (14) \\ \sum_{t \in T_D} q_{b,i,t} = \sum_{t \in T_D} q_{a,i,t} & (15) \\ \text{sgn}[(q_{b,i,t} - q_{a,i,t})(q_{a,i,t} - q_{b,i,t})] = -1 & (16) \end{cases}$$

式中:  $\Delta Q_{\max}$ 为用户负荷调节上限;  $Q_{\max}$ 为用户的最大额定负荷;  $Q_{L,t}$ 为  $t$ 时段用户的基线负荷;  $I[(q_{b,i,t} - q_{a,i,t}) \geq 0]$ 为示性函数,具体含义与式(9)相同。

式(12)~(14)为用户优化自身调节能力的约束。其中:式(12)为用户调节上下限;式(13)表示用户  $t$ 时刻最大承受负荷量;式(14)表示用户负荷削减量的上限;式(15)表示用户节点单日负荷需求总量不变;式(16)保证用户节点仅处于一个状态,即增负荷状态或减负荷状态。

**步骤4** 低碳经济兼容需求响应效益评估。首先,基于步骤3的计算方法,可以得到用户群全年的低碳经济效益。接着,分别运用式(17)、式(18)和式(19)进行计算,可得到用户群体在需求响应机制下的全年碳减排量、碳成本和碳市场收益。

$$\Delta E_{CO_2,Y} = \sum_{i=1}^I \sum_{t \in T_Y} (q_{b,i,t} - q_{a,i,t}) \Delta t e_{i,t} \quad (17)$$

$$C_{CO_2,Y} = \sum_{i=1}^I \sum_{t \in T_Y} C_{c,i,t} \quad (18)$$

$$\Delta E_{CO_2,Y} = C_{CO_2,Y,b} - C_{CO_2,Y,a} \quad (19)$$

式中:  $\Delta E_{CO_2,Y}$ 、 $C_{CO_2,Y}$ 、 $\Delta C_{CO_2,Y}$  分别为用户联盟群体全年的碳减排量、碳成本以及碳市场收益;  $T_Y$  为全年总时段数;  $C_{CO_2,Y,b}$ 、 $C_{CO_2,Y,a}$  分别为用户用电行为为优化前和优化后的全年碳排放成本。

整个电力系统由多个联盟体的碳责任组成, 因此, 本文提出的低碳经济兼容需求响应可以为系统带来全年的碳减排效益; 在用户节点层面, 用户可根据动态负荷碳势曲线, 以及碳配额分配和碳价设定方案, 调整自身的用电行为, 以期满足低碳以及经济效益的双重需求。

## 4 算例分析

### 4.1 基础数据

本文采用 GAMS 软件编程, 并调用 CPLEX 求解器进行求解。采用 PJM-5 节点系统进行算例分析, 该系统的网络结构如图 3 所示, 主要包含 5 个机组、3 个负荷和 6 条支路, 机组的基本参数见表 1<sup>[25]</sup>。设定低碳经济优化周期为 24 h, 每个时间段设定为 1 h, 负荷及新能源日内出力预测曲线如图 4 所示。

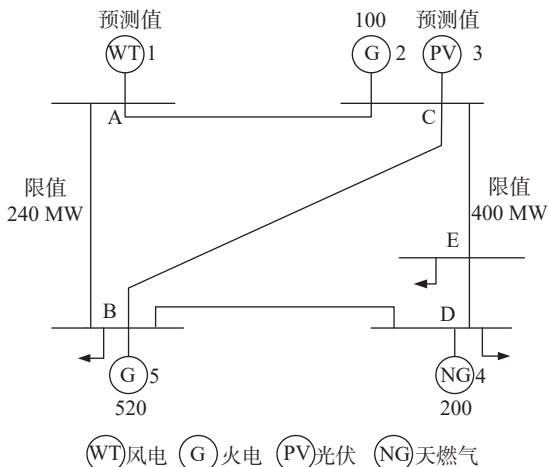


图 3 PJM-5 节点系统

Fig.3 PJM-5 node system

根据基于 Shapley 值的碳配额分配理论和阶梯区间碳价设定方案的内容, 将碳价进行阶梯型分段: 第一阶段为  $0 \sim V_{t,min}$ ; 第二阶段为  $V_{t,min} \sim V_{t,av}$ ; 第三阶段为  $V_{t,av} \sim V_{t,max}$ ; 最后一个阶段为  $V_{t,max} \sim \infty$ , 碳价参数设定参考文献 [26], 具体数值如表 2 所示。

表 1 机组参数

Tab.1 Unit parameters

机组编号	发电类型	最大出力/MW	碳排放系数/( $tCO_2 \cdot (MW \cdot h)^{-1}$ )
1	风电	预测值	0
2	火电	100	1.13
3	光伏	预测值	0
4	天然气	200	0.38
5	火电	520	1.13

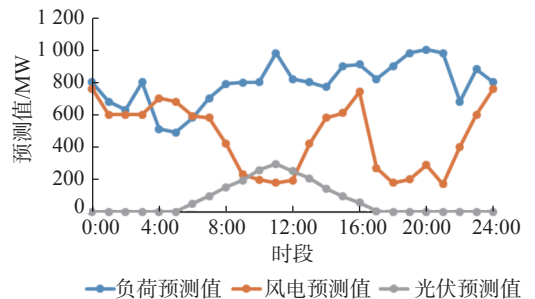


图 4 负荷及新能源日内出力预测曲线

Fig.4 Forecasting curve of load and daily output of new energy

表 2 阶梯碳价设定

Tab.2 Step carbon price setting

分段	碳价(美元/ $tCO_2$ )
$0 \sim V_{t,min}$	$p_1 = 0$
$V_{t,min} \sim V_{t,av}$	$p_2 = 5$
$V_{t,av} \sim V_{t,max}$	$p_3 = 10$
$V_{t,max} \sim \infty$	$p_4 = 20$

### 4.2 基于 Shapley 值的碳配额计算及分析

基于图 3 可知, 系统中的 3 个负荷节点分别位于 B、D、E 上, 因此, 全联盟中共有 6 个子联盟, 分别为  $\{B\}$ 、 $\{D\}$ 、 $\{E\}$ 、 $\{B, D\}$ 、 $\{D, E\}$ 、 $\{B, E\}$ 。本文计算各子联盟在  $t=1:00$  的总碳排放量, 结果如图 5 所示。

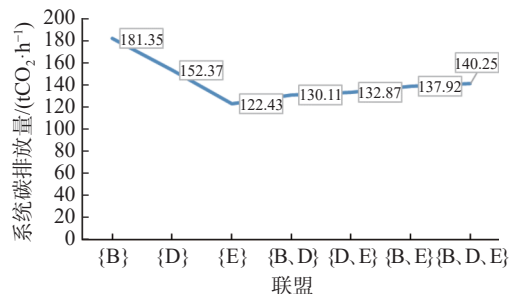


图 5 联盟碳排放量

Fig.5 Responsibility for alliance carbon emissions

由基于 Shapley 值的碳配额分配理论可知, 用户节点的碳责任承担值应该在边际作用的范围



内, 不应该小于边际作用的最小值  $V_{i,\min}$ , 也不应该大于边际作用的最大值  $V_{i,\max}$ 。接下来, 以节点 D 为例, 计算其碳排放责任区间。已知子联盟  $\{D\}$  情景下 D 节点的碳排放量为  $152.37 \text{ tCO}_2/\text{h}$ 、 $E\{D, E\} - E\{E\} = 10.44$ 、 $E\{B, D, E\} - E\{B, E\} =$

$$C_{c,i,t} = \begin{cases} p_1 E_{i,t}, & 0 \leq E_{i,t} < 2.33 \\ p_2 (E_{i,t} - V_i), & 2.33 \leq E_{i,t} < 44.77 \\ p_3 (E_{i,t} - 44.77) + p_2 (44.77 - V_i), & 2.33 \leq V_i < 44.77 \leq E_{i,t} < 152.37 \\ p_3 (E_{i,t} - V_i), & 44.77 \leq V_i < E_{i,t} < 152.37 \\ p_3 (152.37 - V_i) + p_4 (E_{i,t} - 152.37), & 44.77 \leq V_i < 152.37 \leq E_{i,t} \\ p_4 (E_{i,t} - 152.37), & 152.37 \leq V_i < E_{i,t} \end{cases} \quad (20)$$

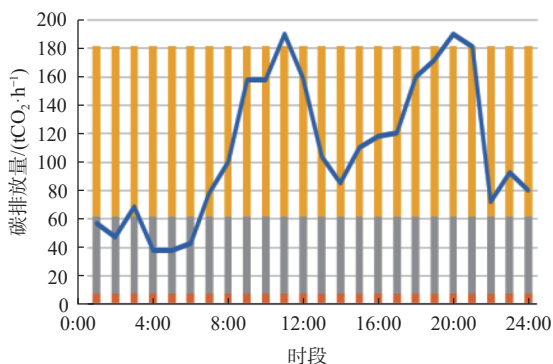
在对用户节点进行碳责任分配后, 可以计算 3 个节点的碳责任分配区间, 根据区间设定, 将碳价进行阶梯型划分, 分别分为 4 个部分, 依次用红色、灰色、黄色以及超出黄色区域表示, 结果由图 6 所示。

通过图 6 的设定结果可知, 在 D、E 用户节点拥有相同负荷情况下, 由于线路的传输极限约束, 两者的实际碳排放量曲线稍有差别, 节点 D 的日内碳排峰值在  $t=11:00$ , 而节点 E 的日内碳排

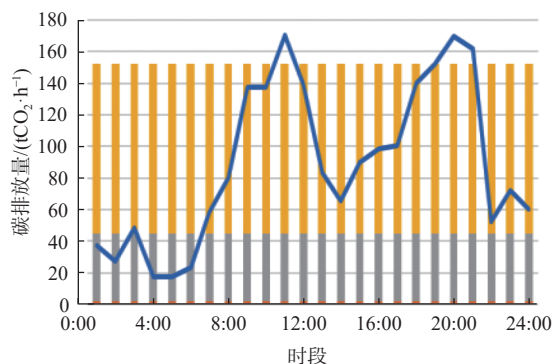
峰值在  $t=12:00$ 。另外, 节点 E 的针对碳价的碳排阶梯区间为  $[10.14, 33.7, 122.43]$ , 其最大值的设定比 D 节点少  $29.94 \text{ tCO}_2/\text{h}$ , 这是因为节点 D 与 5 号机组直接连接, 该机组为火电发电方式, 碳排放系数较高。同时, 节点 E 随机与组 2 相连接, 但是由于线路传输限制约束, 碳排放量会有所降低, 缺少负荷部分由 4 号机组补充; 将图 (a) 和图 (b) 进行比较可知, 用户节点 B 由于负荷最大且与 5 号机组相连接, 因此, 其实际碳排放曲线

综上所述, 用户节点 D 在  $t=1:00$  的阶梯碳成本为

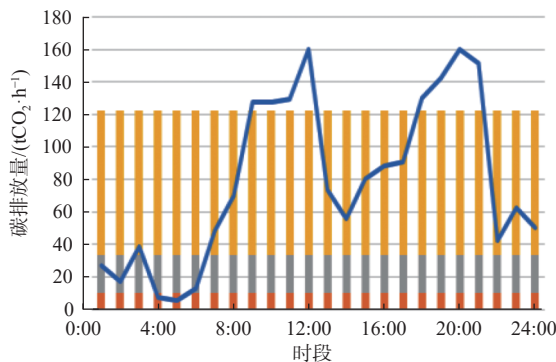
峰值在  $t=12:00$ 。另外, 节点 E 的针对碳价的碳排阶梯区间为  $[10.14, 33.7, 122.43]$ , 其最大值的设定比 D 节点少  $29.94 \text{ tCO}_2/\text{h}$ , 这是因为节点 D 与 5 号机组直接连接, 该机组为火电发电方式, 碳排放系数较高。同时, 节点 E 随机与组 2 相连接, 但是由于线路传输限制约束, 碳排放量会有所降低, 缺少负荷部分由 4 号机组补充; 将图 (a) 和图 (b) 进行比较可知, 用户节点 B 由于负荷最大且与 5 号机组相连接, 因此, 其实际碳排放曲线



(a) 用户节点B的碳价区间设定示意图



(b) 用户节点D的碳价区间设定示意图



(c) 用户节点E的碳价区间设定示意图

—  $p_1$ 段碳排放量 —  $p_2$ 段碳排放量 —  $p_3$ 段碳排放量 — 实际碳排放量

图 6 用户节点的碳价区间设定示意图

Fig.6 Schematic diagram of carbon price range setting for user nodes

总体高于用户节点 D, 相应的碳责任分配值也最大; 同理, 对比图 (a)、图 (b) 和图 (c) 可知, 节点 E 负荷源头的清洁能源占比较高, 因此, 节点 E 的实际碳排曲线最低。综上所述, 基于 Shapley 值的碳配额分配理论可以在满足用户负荷的基础上, 进行节点碳责任的合理分摊。

### 4.3 需求响应结果分析

假设用户节点的 5% 负荷可以参与到低碳经济需求响应中, 现以用户节点 B 为例进行低碳经济需求响应结果的分析。用户节点 B 典型日下参与需求响应的负荷变化情况如图 7 所示。

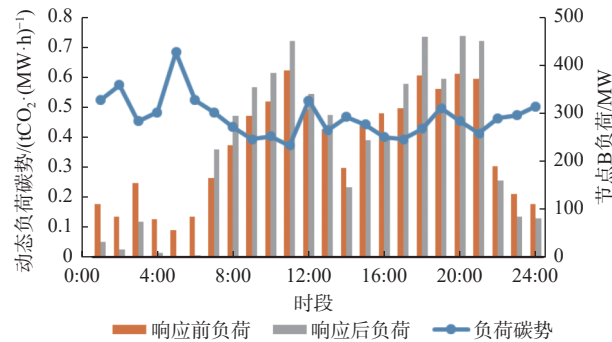


图 7 用户节点 B 需求响应前后负荷对比

Fig.7 Load comparison of user node B before and after demand response

由图 7 可以看出, 用户节点 B 在得知碳表装置提供的动态负荷碳势数据后, 为了实现低碳经济性目标, 将自觉调整用电负荷时刻, 降低高负荷碳势时段 (1:00—7:00、12:00—15:00、22:00—24:00) 的用电负荷并将该部分转移至低负荷碳势时段 (8:00—11:00、16:00—21:00)。另外, 用户节点 B 在响应前后的总需求负荷不变, 证明了本文提出的低碳经济优化模型可以在满足用户用电需求的基础上, 实现降低碳排的目标。

由于本文采用阶梯碳价设定方案, 将低碳经济效益与节点减排行为进行深度融合, 使用户节点参与碳市场的积极性得到有效提升。为进一步验证阶梯碳价设定方案的优越性, 本文设定不同碳价设定环境 (恒定碳价和阶梯式碳价场景), 并分析不同环境下节点负荷的调整情况。图 8 为不同碳价方案下节点 B 的负荷日内曲线。

由图 8 可以看出, 恒定碳价下用户在高负荷碳势时段 (12:00—15:00) 用电量不降反增, 而在低负荷碳势时段 (8:00—11:00) 用电量并没有升高。这是因为目前电价的设定方案为分时电价模式, 使得恒定碳价方案下的用户节点受到电价的经济

激励程度要大于碳市场的经济激励程度, 使得用户在低碳和经济两方面领域中偏向经济领域, 无法实现低碳电力的目标。综上可得, 本文提出的阶梯碳价区间设定模式有效解决了电价高低与低碳目标的矛盾, 在保证用户经济效益的同时能够降低电力系统总碳排放量。

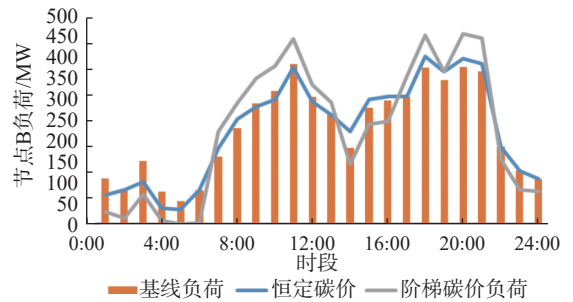


图 8 用户节点 B 不同碳价方案的负荷对比

Fig.8 Load comparison of different carbon price schemes for user node B

## 5 结 论

为了完善传统电力系统碳排计算方案, 更好地解决“荷侧”用电行为关联性较低、电力系统运行的经济性与环保性不平衡等问题, 本文提出基于碳排放流的电力系统低碳经济优化模型。文中所做工作及主要结论如下:

a. 基于碳排放流理论获取用户动态负荷碳势, 更精确地从时间和空间两个层面测算用户的用电碳排放量, 可得到用户节点过去、现在和未来的动态节点碳势以及相应的动态负荷碳势曲线, 有效实现对用户用电行为的低碳约束。

b. 基于 Shapely 值的碳配额分配方法合理地分摊给各节点相应的碳责任, 具体的碳责任分配量可对应用户负荷大小、地理位置。由此计算用户节点的碳配额分配合理区间, 以促进其参与碳市场交易。由不同碳配额规划区间, 提出阶梯碳价设定方案, 以经济因素激励用户节点调整负荷曲线, 使节点的碳成本得到有效的降低。

c. 算例分析结果表明, 本文所采用的碳配额分配方法可为各用户节点分摊合理的碳责任, 并且能够在保障用户用电需求的前提下, 综合低碳性和经济性两个方面, 在降低电力系统的碳排放量的同时提高节点的碳收益。

未来可基于本研究成果, 考虑绿证市场、碳交易市场以及电力市场之间的耦合关系, 以促进

可再生能源的消纳, 推动电力系统低碳转型。

#### 参考文献:

- [1] 王全意, 陶麒宇. 碳交易试点政策对产业结构优化的影响及区域差异性分析 [J]. 重庆理工大学学报(社会科学), 2023, 37(11): 64–75.
- [2] 魏泓屹, 卓振宇, 张宁, 等. 中国电力系统碳达峰·碳中和转型路径优化与影响因素分析 [J]. 电力系统自动化, 2022, 46(19): 1–12.
- [3] YANG X Y, MENG L Z C, GAO X T, et al. Low-carbon economic scheduling strategy for active distribution network considering carbon emissions trading and source-load side uncertainty[J]. *Electric Power Systems Research*, 2023, 223: 109672.
- [4] 赵伟, 熊正勇, 潘艳, 等. 计及碳排放流的电力系统低碳规划 [J]. 电力系统自动化, 2023, 47(9): 23–33.
- [5] 姜海洋, 杜尔顺, 金晨, 等. 高比例清洁能源并网的跨国互联电力系统多时间尺度储能容量优化规划 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6): 2101–2114.
- [6] 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.
- [7] 周天睿, 康重庆, 徐乾耀, 等. 电力系统碳排放流的计算方法初探 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36(11): 44–49.
- [8] DAI H B, HUANG G Q, ZENG H B. Multi-objective optimal dispatch strategy for power systems with Spatio-temporal distribution of air pollutants[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2023, 98: 104801.
- [9] PAN J, LIU X O, HUANG J J. Multi-level games optimal scheduling strategy of multiple virtual power plants considering carbon emission flow and carbon trade[J]. *Electric Power Systems Research*, 2023, 223: 109669.
- [10] ZHANG G, WEN J, XIE T, et al. Bi-layer economic scheduling for integrated energy system based on source-load coordinated carbon reduction[J]. *Energy*, 2023, 280: 128236.
- [11] LI G H, NIU M M, XIAO J, et al. The rebound effect of decarbonization in China's power sector under the carbon trading scheme[J]. *Energy Policy*, 2023, 177: 113543.
- [12] SUN H B, SUN X M, KOU L, et al. Optimal scheduling of park-level integrated energy system considering ladder-type carbon trading mechanism and flexible load[J]. *Energy Reports*, 2023, 9: 3417–3430.
- [13] JIAO P H, CAI X, WANG L L, et al. Flexibility operation for integrated energy system considering hydrogen energy under inertia characteristics and stepped carbon trading mechanism[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2023, 98: 104809.
- [14] LIANG N, HE X Y, TAN J, et al. Stackelberg game-based optimal scheduling for multi-community integrated energy systems considering energy interaction and carbon trading[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2023, 153: 109360.
- [15] YAN N, MA G C, LI X J, et al. Multi-stakeholders energy management and control method of integrated energy system considering carbon trading mechanism[J]. *Energy Reports*, 2022, 8: 1090–1098.
- [16] WANG H X, CAI X Y, LU X Y, et al. A novel load-side settlement mechanism based on carbon emission flow in electricity spot market[J]. *Energy Reports*, 2023, 9: 1057–1065.
- [17] YANG C, LIU J J, LIAO H X, et al. An improved carbon emission flow method for the power grid with prosumers[J]. *Energy Reports*, 2023, 9: 114–121.
- [18] 刘昱良, 李姚旺, 周春雷, 等. 电力系统碳排放计量与分析方法综述 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(6): 2220–2235.
- [19] 王硕, 霍慧娟, 徐丹, 等. 计及特高压交流工程建设的区域碳减排测算及分摊 [J]. 中国电力, 2024, 57(7): 163–172.
- [20] ZHANG B, WU X W, GHAS A M Y M, et al. Coordinated carbon capture systems and power-to-gas dynamic economic energy dispatch strategy for electricity-gas coupled systems considering system uncertainty: an improved soft actor-critic approach[J]. *Energy*, 2023, 271: 126965.
- [21] 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): 2830–2841.
- [22] ZHOU Q, SHAHIDEHPOUR M, SUN T, et al. Cooperative game for carbon obligation allocation among distribution system operators to incentivize the proliferation of renewable energy[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(6): 6355–6365.
- [23] GALLARDO J M, JIMÉNEZ-LOSADA A. A characterization of the Shapley value for cooperative games with fuzzy characteristic function[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2020, 398: 98–111.
- [24] 岳云力, 李倩, 方勇, 等. 考虑风电消纳的电供暖多方合作博弈研究 [J]. 浙江电力, 2020, 39(9): 95–102.
- [25] XU J, WANG X Y, GU Y J, et al. A data-based day-ahead scheduling optimization approach for regional integrated energy systems with varying operating conditions[J]. *Energy*, 2023, 283: 128534.
- [26] YI T, ZHANG C M. Scheduling optimization of a wind power-containing power system considering the integrated and flexible carbon capture power plant and P2G equipment under demand response and reward and punishment ladder-type carbon trading[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2023, 128: 103955.