

混合电力市场下面向低碳目标的碳排放溯源方法

张佳诚, 赵宣茗, 晏才鑫, 曹伟, 杨鑫, 裘智峰

(中南大学自动化学院, 长沙 410083)

摘要: 在混合电力市场中, 交易耦合造成源荷间碳排放路径追踪复杂、网损碳责任分摊机制不明等问题, 制约新型电力系统实现精准碳计量。为此面向低碳导向的碳排放管理目标设计了融合有向图建模与路径优化的碳排放路径追踪和网损双向分摊框架及实现方法。通过构建虚拟无损网络, 实现双边交易与联营交易的解耦。针对双边交易单源-单汇的网络结构, 引入碳排放因子优先机制, 构建低碳路径优先分配的最大流模型。针对联营交易多源-多汇的网络结构, 设计“先BFS排序后DFS追踪”的双向分摊机制, 构建虚拟节点碳流分布的递推序列。算例表明, 该框架有效提升了混合电力市场碳排放溯源的精准性与公平性, 凸显了低碳导向下的路径追踪价值, 为“双碳”目标下的低碳电力系统发展提供技术支撑。

关键词: 低碳导向; 碳排放溯源; 网损分摊; 混合电力市场; 图论

Carbon Emission Tracing Method Oriented to Low-Carbon Objectives in Hybrid Power Markets

ZHANG Jiacheng, ZHAO Xuanming, YAN Caixin, CAO Wei, YANG Xin, QIU Zhifeng

(School of Automation, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: In hybrid electricity markets, the coupling of transactions complicates the tracing of carbon emission paths between sources and loads, while the mechanism for allocating carbon responsibilities associated with network losses remains unclear. These challenges hinder the realization of accurate carbon accounting in new electricity system. To address this challenge and align with low-carbon-oriented carbon management objectives, a framework and methodology for carbon emission path tracing and bidirectional allocation of network losses is proposed, integrating directed graph modeling with path optimization. A virtual lossless network is constructed to decouple bilateral trading from pool trading. For the single-source-single-sink structure of bilateral trading, a low-carbon path priority maximum flow model is developed by introducing a carbon emission factor-based prioritization mechanism. For the multi-source-multi-sink structure of pool trading, a “BFS ordering followed by DFS tracing” mechanism is designed to achieve bidirectional allocation, thereby a recursive sequence for virtual node carbon flow distribution is established. Case studies demonstrate that the proposed framework significantly enhances the accuracy and fairness of carbon emission tracing in hybrid markets, highlights the value of low-carbon-oriented path tracing, and provides technical support for the development of low-carbon power systems under the “dual-carbon” goals.

Key words: low-carbon orientation; carbon emission tracing; network loss allocation; hybrid electricity market; graph theory

0 引言

电力行业的低碳转型对“双碳”目标的实现发挥着决定性作用^[1-2], 精准核算并评估各环节的清洁低碳水平对实现整体系统低碳化至关重要^[3]。同时

随着我国电力市场化改革的不断深化, 双边交易与联营交易并存的混合交易机制已基本形成^[4-5]。碳成本通过市场向下游电价传导。然而, 与电价信号相比, 碳价信号在传导过程中存在时间滞后和空间失真的问题^[6-7], 增加了电力用户感知电能碳足迹的困难, 削弱了其减排意愿。此外, 混合交易机制下的传输路径呈现“集中与分散”、“耦合与独立”共存的网络特性^[8], 导致碳排放路径交叉叠加, 网络损

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62073345)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (62073345).

耗碳排分摊复杂^[9]。因此,建立碳责任与电力流对应的追溯机制,有利于揭示碳排放的形成与传递规律,为低碳决策与市场化激励机制提供量化依据。

目前,全国碳排放权交易体系以“发电侧控排”为核心,核算对象为发电单元燃料燃烧所产生的直接碳排放^[10-11],属于直接核算法^[12]。电网层面和用户侧已能获得较为精确的电能计量数据^[13],但电量数据仅反映“用了多少电”,无法区分不同电源的碳属性差异、缺乏刻画边际碳排放强度的时空动态特性的能力,也难以支撑网络损耗碳责任的合理归属。相比之下,作为间接核算法的碳溯源机制立足于“负荷侧驱动”,不再局限于源头的总量统计,通过刻画电力传输过程中的碳流分布与责任转移机制,揭示从发电到负荷的碳排放传递路径,有效回答“用的电力对应的碳排有多高”,“传输网损对应的碳谁来分担”等关键问题^[14],所建立的“源-网-荷”之间碳责任映射关系实现输电环节与用电行为在碳排放中责任的科学、公平界定^[15-16]。

在体系定位上,因其核算口径侧重于碳排在电力传输过程中的路径与归属分析,碳溯源机制与现行的碳排放权交易体系不存在核算重叠问题,具有互为补充的关系。同时,相较于基于时间与空间边界的宏观统计思路^[17],碳溯源方法更侧重于刻画交易与物理路径层面的碳排放传递特征。一方面,在现阶段电、碳市场相对独立的背景下,碳溯源结果可以用来辅助低碳交易决策与低碳导向的系统运行优化;另一方面,也可为未来电-碳市场的有效协同,以及构建面向电-碳耦合的新型市场交易机制提供基础条件^[18-20]。

因此,在“源网荷储碳数”六要素融合驱动下^[21],在混合电力市场环境下,如何构建面向低碳目标的碳追踪模型与分析框架,实现碳排放路径的精准追踪、溯源以及网损碳排的合理分配是建立新型电力系统实现电-碳有效协同的有效路径。

在研究碳排放追踪方法中,图论方法因其基于严密的数学逻辑与网络拓扑架构,在处理复杂网络结构时展现高度灵活性与适应性^[22],被视为高效求解工具。文献[23]提出适用于联营市场的碳流分布与路径追踪算法,利用广度优先(breadth first search, BFS)和深度优先搜索(depth first search, DFS),分别实现碳排在电网中的分层分布与路径追踪,刻画发电侧至负荷侧的碳流传递路径信

息。文献[24-25]基于图论和互补图关系,将双边交易建模为源-荷之间所有双边交易流匹配量最大的问题,通过改进最短增广路算法实现了考虑网损的碳流率核算与分配。上述文献仅对单一的联营市场或者双边交易用图论进行刻画,未能考虑两者并存市场环境下的可视化碳流路径追踪框架。

在电力系统碳追踪方法中,由网损产生的碳排放必须给予考虑,这部分的碳排放量源自为补偿传输损耗所需的额外电能。“双高”背景下,输电线路的网损水平显著增加^[26-27],若缺乏合理的网损碳排放分摊机制,此部分的碳核算结果将与系统的实际运行状态产生偏差,导致“碳失真”与责任划分不合理等问题^[28-29]。同时,由于电力系统潮流与网损存在非线性关系,使得电力市场中所有交易产生的总网损不是各笔交易独立网损的线性叠加,随之产生的交叉耦合效应增加了网损碳排放精准归属与合理分摊的难度。

针对路径追踪和责任分摊等问题,本文的创新点和贡献主要包括以下三方面。

1)构建基于图论的混合交易碳流追踪与核算体系。针对双边交易,引入Dinic最大流算法实现源-荷低碳路径优化分配;针对联营交易,融合BFS与DFS实现碳流路径递推分摊与追踪,实现了碳排放传输路径的全链路精细化建模与分配。

2)提出“先BFS排序后DFS追踪”的联营交易网损碳流率双向分摊机制。通过BFS构建虚拟节点有序分摊序列避免环路死锁,再采用DFS逐轮递推虚拟碳流率,并引入收敛判据,实现网损碳排放责任在发电侧与负荷侧的公平分摊。

3)提出基于低碳优先的LCP-Dinic算法。在Dinic最大流中引入碳排放因子排序机制,使低碳交易在路径增广过程中优先分配流量,保障绿色电力优先占用优质传输路径,提升了双边交易的低碳导向性和网损碳排放分摊精度。

1 基于图论的混合交易碳流追踪模型

混合电力市场主要由联营交易(pool trading)和双边交易(bilateral trading)组成。两种交易模式在交易结构和电量匹配机制上存在显著差异,导致其碳排放流路径和网络分布特性明显不同。联营交易通过电网运营机构集中撮合,形成多源-多汇的高度耦合网络结构;双边交易则由发电方与用电方直

接协商形成,具有明确的供需对应关系,呈现单源-单汇的独立路径特性。

鉴于电力系统与图网络在拓扑结构上存在天然映射关系,本文采用图论方法,将电力网络抽象为有向图 $G=(V, E)$,用节点和有向边分别表征母线与输电线路。从“图”视角出发,可统一刻画双边与联营交易的电力传输逻辑,并为后续碳流追踪与网损分摊提供结构化建模基础。

1.1 基于图的混合市场碳流追踪模型框架

搭建混合电力市场下基于图的碳流追踪模型框架如图1所示。

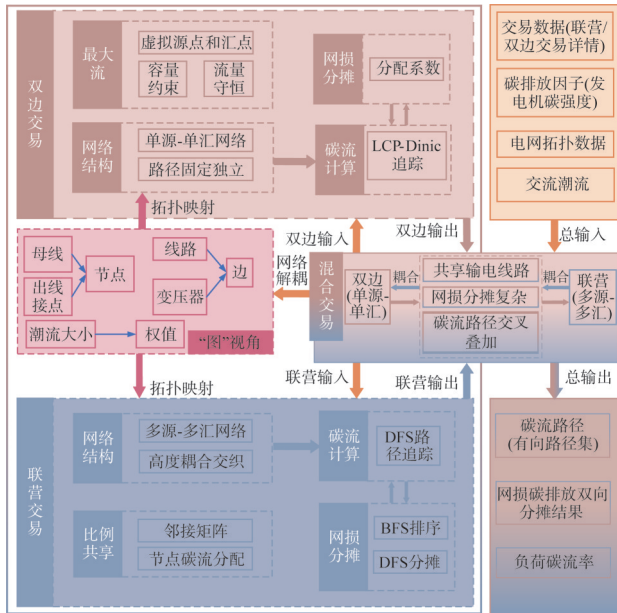


图1 混合电力市场下基于图的碳流追踪模型框架

Fig. 1 Graph-based carbon flow tracking model framework in the hybrid power market

1.2 基于比例共享原则的联营交易模型

为了对联营交易下节点间的碳排放流贡献与汲取关系进行描述,需要对各个顶点间的功率传递信息进行记录,定义邻接矩阵 A 来刻画节点之间的关系,设图 $G=(V, E)$ 中, V 为节点集合, E 为有向边集合, i, j, k 为节点编号。邻接矩阵 A 如式(1)所示。

$$A = \begin{cases} w_{ij}, & (v_i, v_j) \in E \\ 0, & i = j \\ \infty, & (v_i, v_j) \notin E \end{cases} \quad (1)$$

式中 w_{ij} 为从顶点 v_i 指向顶点 v_j 边的权值。联营交易中,电力网络潮流从多个发电厂流向多个用户,流动路径受系统约束和优化目标的影响,呈现多源多汇的

复杂特性。可以用比例共享原则对碳排放流在联营交易网络中的分布机理进行研究。节点碳流的分配关系如图2所示,其中中间节点 v_k 的碳流分配可表述为:

$$R_{j,i}^{PT} = R_{ik}^{PT} \frac{P_{kj}^{PT}}{P_{v_k}^{PT}} \quad (2)$$

式中: $R_{j,i}^{PT}$ 为边 (v_i, v_k) 碳流率 R_{ik}^{PT} 对边 (v_k, v_j) 碳流率 R_{kj}^{PT} 的贡献; P_{kj}^{PT} 为通过边 (v_k, v_j) 流出节点 k 的联营功率; $P_{v_k}^{PT}$ 为节点 k 总联营注入功率。

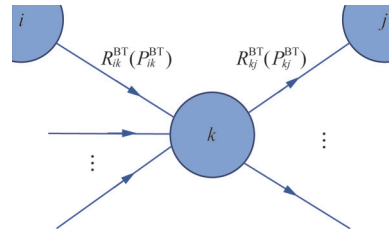


图2 节点碳流分配

Fig. 2 Allocation of carbon flow at nodes

1.3 基于最大流的双边交易模型

双边交易中源-荷对应关系明确,但不同交易对在共享线路上的潮流叠加导致支路损耗路径耦合,碳排放责任难以在源荷两侧公平划分。而最大流模型可显式识别各交易对的可行传输路径及功率流量,在支路容量约束下计算交易使用份额,为路径追踪和网损碳排放分摊提供了具有可解释性和可追溯性的有效手段。

对于初始潮流加权有向图 $G^{\text{initial}}=(V, E)$,如图3所示。通过添加虚拟源点 $s \in V$ 和虚拟汇点 $t \in V$,并分别连接所有发电与购电节点,可将双边交易等效为从 s 到 t 的最大流问题。

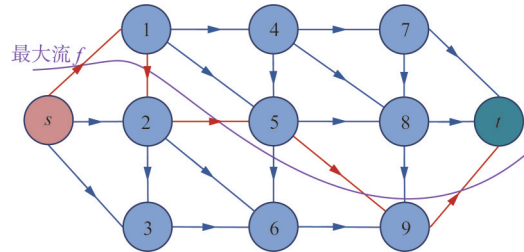


图3 双边交易的网络流模型

Fig. 3 Network flow models for bilateral transactions

2 双边交易网络碳流路径追踪

2.1 虚拟无损网络的构建

交叉问题使得计算每笔交易对网损的贡献增加

了难度。为了实现输电损耗在不同交易下对各机组碳流率的溯源以及后续碳排放的合理分摊,首先要对网损进行表征,对相应支路进行无损化操作。如图4(a)所示,在边 (v_i, v_j) 上引入虚拟节点 v_δ 代表所在支路的损耗 P_{L, v_δ}^{BT} ,设为相应的虚拟负荷。对整个有损潮流加权有向图进行无损化操作,可将有损网络转化为无损网络,如图4(b)所示。

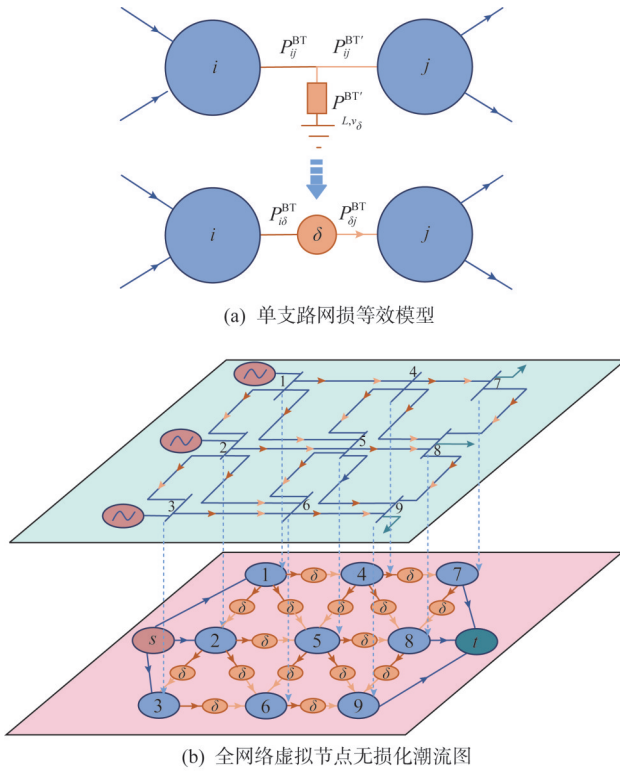


图4 虚拟节点无损化处理

Fig. 4 Lossless processing of virtual nodes

2.2 双边交易网络的碳流追踪模型

由1.3节可知,最大流问题是在满足流量守恒与边容量约束条件下,求解源点 s 至汇点 t 的最大可行流,其建模机制与电力系统潮流传输规律相契合,所得最大流结果反映了交易路径上可实现的最大双边交易匹配量。该问题可表示为如下线性规划模型。

$$y = \max \sum_{b=1}^{\Omega_{\text{pair}}^{BT}} P_t^{BT_b} \quad (3)$$

$$\text{s.t. } P_s^{BT_b} \leq P_g^{BT_b} \quad (4)$$

$$P_t^{BT_b} \leq P_L^{BT_b} \quad (5)$$

$$\sum_{(v_i, v_k) \in E} P_{ik}^{BT_b} = \sum_{(v_k, v_j) \in E} P_{kj}^{BT_b} \quad (6)$$

$$\sum_{(v_i, v_\delta) \in E} P_{i\delta}^{BT_b} = \sum_{(v_\delta, v_j) \in E} P_{\delta j}^{BT_b} + P_{L, v_\delta}^{BT_b} \quad (7)$$

$$\sum_{b=1}^m P_{ij}^{BT_b} \leq P_{ij} \quad (8)$$

式中: y 为双边交易网络中的最大可匹配交易量; $\Omega_{\text{pair}}^{BT}$ 为双边交易对数量的集合; BT_b 为第 b 个双边交易对; k 为中间节点; $P_s^{BT_b}$ 、 $P_t^{BT_b}$ 分别为双边交易对 BT_b 中的售电侧向购电侧贡献的实际匹配交易量和购电侧从售电侧汲取的实际匹配交易量; $P_g^{BT_b}$ 为双边交易对 BT_b 对应机组的实际出力; $P_L^{BT_b}$ 为双边交易对 BT_b 对应负荷的实际负荷; $P_{ik}^{BT_b}$ 为双边交易对 BT_b 通过有向边 (v_i, v_k) 注入中间节点的功率; $P_{kj}^{BT_b}$ 为双边交易 BT_b 通过有向边 (v_k, v_j) 流出中间节点的功率; $P_{ij}^{BT_b}$ 为双边交易对 BT_b 在有向边 (v_i, v_j) 匹配的交易量; $P_{L, v_\delta}^{BT_b}$ 为双边交易对 BT_b 对虚拟节点 v_δ 即线路损耗贡献的功率大小; P_{ij} 为通过求解交流潮流得到的有向边 (v_i, v_j) 的潮流大小。式(4)–(5)为售电商和购电商匹配电量的潮流约束;式(6)节点潮流平衡约束,表示对于图中的任意中间节点,双边交易对 BT_b 注入的交易量等于流出的交易量;式(7)为支路损耗约束,表示对于图中的虚拟节点 v_δ ,双边交易对 BT_b 注入的交易量等于流出的交易量与虚拟负荷即损耗之和;式(8)为输送线路容量约束,表示所有双边交易对 BT_b 在有向边 (v_i, v_j) 的交易匹配量之和要小于潮流传输容量。

根据交易路径上得到的潮流分布情况以及交易对源荷间的功率传递关系,可进一步推导各笔双边交易在系统中碳排放的分布特性。可以得到双边交易对中源侧碳排放强度为 $e_g^{BT_b}$ 的机组对荷侧实际负荷的碳流率贡献 $R_L^{BT_b}$ 以及对虚拟节点所在虚拟负荷的碳流率贡献 $R_{L, v_\delta}^{BT_b}$ 。

$$R_L^{BT_b} = P_t^{BT_b} e_g^{BT_b} \quad (9)$$

$$R_{L, v_\delta}^{BT_b} = P_{L, v_\delta}^{BT_b} e_g^{BT_b} \quad (10)$$

为了更公平地反映电力网络中网损碳排放的责任归属,引入 $[0, 1]$ 区间内的网损分配系数 γ ,将网络损耗的 γ 分摊至源侧发电单元,将剩余的 $1 - \gamma$ 分配至使用该交易路径的负荷侧。

$$R_{g\delta}^{BT_b} = \gamma R_{L, v_\delta}^{BT_b} \quad (11)$$

$$R_{L\delta}^{BT_b} = (1 - \gamma) R_{L, v_\delta}^{BT_b} + R_L^{BT_b} \quad (12)$$

式中: $R_{g\delta}^{BT_b}$ 为双边交易下将网损碳排放归算至源侧后售电商应该承担的碳排放责任; $R_{L\delta}^{BT_b}$ 为双边交易

下将网损碳排放归算至荷侧后购电用户应该承担的碳排放责任。

2.3 双边交易网络的碳溯流模型求解

Dinic算法通过分层图构建和增广路径逐层推进,可在每轮迭代中清晰输出增广路径集合,为碳流路径提取和网损碳流率责任划分提供了良好可解释性。然而,传统Dinic算法通常按交易序号或随机方式分配流量,导致可行解存在任意性,易造成输电容量利用率降低、网损碳分摊不均,也不利于绿色电力优先消纳和碳排放准确追踪。

为此,本文提出基于低碳排放因子优先排序机制(low carbon priority)的改进算法LCP-Dinic。该算法在初始化阶段按发电机碳排放强度对交易对进行升序排序,并将排序序列嵌入增广路径迭代中,使低碳交易在每轮增广时优先获得流量。通过动态路径优先机制,低碳电力可优先占用优质输电通道,从而实现含绿色双边交易的低碳最优解。改进LCP-Dinic算法的伪代码如表1所示。

表1 LCP-Dinic算法伪代码

Tab. 1 LCP-Dinic algorithm pseudo code

算法1:LCP-Dinic算法	
1	对每笔交易 $BT_b \in m$,根据其发电侧的碳排因子 $e_g^{BT_b}$ 升序排序,得到交易顺序序列 Ω_{order}^{BT}
2	初始化残差图 $G_{residual}^{BT} \leftarrow G^{initial}$
3	初始化所有边流量矩阵 $F^{BT} \leftarrow 0$
4	for 每笔交易 $BT_b \in \Omega_{order}^{BT}$ do
5	构造临时图 G_{temp}^{BT} ,仅允许 BT_b 的发电节点与负荷节点连接 source 和 sink
6	while BT_b 未完全分配完所需流量 do
7	使用LCP-Dinic算法在 G_{temp}^{BT} 上执行最大流搜索,得到路径集 Ω_{path}^{BT} 及分配流量 f^{BT_b}
8	提取路径信息并保存至路径集 Ω_{order}^{BT}
9	从sink向source回溯每条路径,识别其中虚拟节点
10	for 每个路径上的虚拟节点 v_δ do
11	根据路径流量与原始潮流比例,计算网损功率贡献 $R_{v_\delta}^{BT_b}$
12	计算网损碳排放 $R_{v_\delta}^{BT_b} = P_{v_\delta}^{BT_b} e_g^{BT_b}$
13	将 $R_{v_\delta}^{BT_b}$ 按 γ 分配给发电侧, $1 - \gamma$ 分配给负荷侧
14	end for
15	更新残差图 $G_{residual}^{BT} \leftarrow G_{temp}^{BT} - f^{BT_b}$
16	end while
17	记录 BT_b 的实际达成率和路径碳排放结果
18	end for
19	返回路径集 Ω_{path}^{BT} ,流量矩阵 F^{BT} ,碳排放结果及路径分摊信息

3 混合交易网络碳排放路径的溯源分析

3.1 双边-联营解耦下的分层核算机制

由于交叉问题的存在,混合交易下的碳流路径相互叠加,难以区分碳源。本文基于2.1节提出的虚拟无损网络,对双边交易子网络和联营交易子网络进行解耦处理。

首先,识别无损初始图 $G^{initial}$ 中的所有双边交易对,采用LCP-Dinic算法求解增广路径,获得各交易对匹配的实际双边交易量。

其次,在 $G^{initial}$ 上剥离双边交易网络 G^{BT} 得到联营交易网络 G^{PT} ,剔除双边交易对在源荷两端的功率贡献。联营交易中发电机出力 $P_g^{PT_b}$ 和用户负荷 $P_L^{PT_b}$ 可表示为:

$$P_g^{PT_b} = P_g^{BT_b} - P_s^{BT_b} \quad (13)$$

$$P_L^{PT_b} = P_L^{BT_b} - P_t^{BT_b} \quad (14)$$

最后,在 G^{PT} 上基于比例共享法则推导的DFS算法进行联营交易的碳流路径追踪,并结合双边交易结果,完成混合市场结构下各节点碳排放责任的完整核算。

3.2 DFS碳流路径追踪与分解

假设节点 v_n 处发电机到节点 v_m 处负荷存在 $p^{PT} \in \Omega_{path}^{PT}$ 条路径,其中某条路径含有 $z \in \Omega_{sec}^{PT}$ 条由 v_n 流向 v_m 的有向边 (v_i, v_j) ,根据文献[23]提出的基于比例共享原则和DFS在联营交易网络进行碳流路径追踪的算法,可以得到追踪分摊前节点 v_n 处发电机对节点 v_m 处负荷贡献的碳流率 $R_{L, v_n - v_m}^{PT}$ 以及节点 v_m 处负荷的总碳流率 R_{L, v_m}^{PT} 。

$$R_{L, v_n - v_m}^{PT} = \left[R_{g, v_n}^{PT} \sum_{p^{PT} \in \Omega_{path}^{PT}} \prod_{(v_i, v_j) \in p^{PT}} \frac{P_{ij}^{PT}}{P_{v_i}^{PT}} \right] \frac{P_{L, v_m}^{PT}}{P_{v_m}^{PT}} \quad (15)$$

$$R_{L, v_m}^{PT} = \sum_{n=1}^N R_{L, v_n - v_m}^{PT} \quad (16)$$

式中: R_{g, v_n}^{PT} 为节点 v_n 处发电机注入的联营网络的碳流率; P_{ij}^{PT} 为此路径中边 (v_i, v_j) 流经的联营有功功率; $P_{v_i}^{PT}$ 为路径中边 (v_i, v_j) 上游顶点 v_i 总注入联营功率; P_{L, v_m}^{PT} 为节点 v_m 负荷的联营有功功率; $P_{v_m}^{PT}$ 为节点 v_m 总注入的联营功率; N 为对节点 v_m 处负荷存在碳流贡献的机组数量。

相应地,追踪分摊前节点 v_n 处发电机对虚拟节点 v_{δ_n} 处虚拟负荷贡献的碳流率 $R_{L, v_n - v_{\delta_n}}^{PT}$ 以及虚拟节

点 v_{δ_b} 处虚拟负荷的总碳流率 $R_{L, v_{\delta_b}}^{PT}$ 可以表示为:

$$R_{L, v_{\delta_b}}^{PT} = \left(R_{L, v_{\delta_b}}^{PT} \sum_{p^{PT}} \prod_{\Omega_{path}^{PT}} \frac{P_{ij}^{PT}}{P_{v_i}^{PT}} \right) \frac{P_{L, v_{\delta_b}}^{PT}}{P_{v_{\delta_b}}^{PT}} \quad (17)$$

$$R_{L, v_{\delta_b}}^{PT} = \sum_{n=1}^N R_{L, v_n - v_{\delta_b}}^{PT} \quad (18)$$

式中: $P_{L, v_{\delta_b}}^{PT}$ 为虚拟节点 v_{δ_b} 处虚拟负荷的联营有功功率; $P_{v_{\delta_b}}^{PT}$ 为虚拟节点 v_{δ_b} 总注入的联营功率。

由于不同联营交易路径共享网络支路, 支路碳流存在多路径叠加现象, 因此 DFS 直接追踪得到的碳流量并不等于机组对路径的实际碳流贡献, 需要进一步对路径碳流进行解耦。假设某条碳流路径经由相邻顶点 v_i 、 v_k 、 v_j 汇入终端顶点 v_j 的负荷 P_{L, v_j}^{PT} 。则从负荷节点沿路径向上游回溯, 可得到各边的碳流率分量 $R_{ik}^{PT'}$ 及其对负荷碳流率贡献的分量 $R_{L, v_j}^{PT'}$ 。

$$R_{ik}^{PT'} = R_{kj}^{PT} \frac{P_{v_k}^{PT}}{P_{v_k}^{PT} - P_{L, v_k}^{PT}} \quad (19)$$

$$R_{L, v_j}^{PT'} = R_{ik}^{PT'} \frac{P_{L, v_j}^{PT}}{P_{v_j}^{PT}} \quad (20)$$

式中: P_{kj}^{PT} 为此路径中边 (v_k, v_j) 流经的联营有功功率; $P_{v_k}^{PT}$ 、 $P_{v_j}^{PT}$ 分别为节点 v_k 、 v_j 总注入的联营功率; P_{L, v_k}^{PT} 为节点 v_k 处虚拟负荷的联营有功功率。

3.3 虚拟碳流率的追踪分摊

在联营交易模式下, 虚拟负荷由多个发电单元共同供电, 其对应的虚拟碳流率难以沿明确路径向源荷两侧进行双向分摊。为此, 本文提出一种“先 BFS 排序后 DFS 追踪”的双向碳流分摊机制, 具体流程如图 5 所示。

1) 虚拟碳流率初始化。识别虚拟负荷节点集合 V_{δ} , 读取联营交易网络 G^{PT} 中机组对虚拟节点 v_{δ} 的虚拟负荷贡献 $P_{L, v_{\delta}}^{PT}$, 并按网损分配参数 γ 在虚拟节点 v_{δ} 与机组间实现双向分摊, 得到第 0 轮虚拟节点 v_{δ} 上的初始虚拟碳流率 $R_{L, v_{\delta}, r_0}^{PT}$:

$$R_{g\delta}^{PT} = \gamma R_{L, v_{\delta}}^{PT} \quad (21)$$

$$R_{L, v_{\delta}, r_0}^{PT} = (1 - \gamma) R_{L, v_{\delta}}^{PT} \quad (22)$$

式中: $R_{g\delta}^{PT}$ 为联营交易下归算至源侧的机组网损碳排放责任; r 为追踪分摊轮次。

2) BFS 确定分摊节点顺序。从入度为 0 的发电节点开始, 通过 BFS 遍历构建全网有序分摊序列 $\Omega_{V, BFS}^{PT}$, 避免环路死锁与重复追踪, 并从中提取虚

拟负荷节点对应的分摊顺序 $\Omega_{V_{\delta}, BFS}^{PT}$ 。

3) 多轮 DFS 碳流分摊。根据步骤 2) 确定的虚拟节点分摊顺序 $\Omega_{V_{\delta}, BFS}^{PT}$, 对每一轮的所有虚拟节点 $v_{\delta} \in \Omega_{V_{\delta}, BFS}^{PT}$ 从上游到下游进行 V_{δ} 次 DFS 虚拟网损碳流率的追踪。

$$R_{L, v_{\delta_b} - v_m, r}^{PT} = \left[R_{L, v_{\delta_b}, r}^{PT} \sum_{p^{PT}} \prod_{\Omega_{path}^{PT}} \frac{P_{ij}^{PT}}{P_{v_i}^{PT}} \right] \frac{P_{L, v_m}^{PT}}{P_{v_m}^{PT}} \quad (23)$$

$$R_{L, v_{\delta_b} - v_{\delta_s}, r}^{PT} = \left[R_{L, v_{\delta_b}, r}^{PT} \sum_{p^{PT}} \prod_{\Omega_{path}^{PT}} \frac{P_{ij}^{PT}}{P_{v_i}^{PT}} \right] \frac{P_{L, v_{\delta_s}}^{PT}}{P_{v_{\delta_s}}^{PT}} \quad (24)$$

$$R_{L, v_{\delta_s}, r+1}^{PT} = \sum_{V_{\delta_q}=1}^{\Omega_{upper, v_{\delta_b}}^{PT}} R_{L, v_{\delta_q} - v_{\delta_s}, r}^{PT} + R_{L, v_{\delta_b}, r-1}^{PT} \frac{P_{L, v_{\delta_b}}^{PT}}{P_{v_{\delta_b}}^{PT}} \quad (25)$$

式中: $R_{L, v_{\delta_b} - v_m, r}^{PT}$ 为第 r 轮分摊中虚拟节点 v_{δ_b} 处虚拟碳流率 $R_{L, v_{\delta_b}, r}^{PT}$ 对下游节点 v_m 处负荷贡献的碳流率; $R_{L, v_{\delta_b} - v_{\delta_s}, r}^{PT}$ 为第 r 轮分摊中虚拟节点 v_{δ_b} 处虚拟碳流率 $R_{L, v_{\delta_b}, r}^{PT}$ 对下游虚拟节点 v_{δ_s} 处虚拟负荷贡献的碳流率; $P_{L, v_{\delta_s}}^{PT}$ 为虚拟节点 v_{δ_s} 处虚拟负荷; $P_{v_{\delta_s}}^{PT}$ 为虚拟节点 v_{δ_s} 总注入的联营功率; $\Omega_{upper, v_{\delta_b}}^{PT}$ 为对虚拟节点 v_{δ_b} 处虚拟负荷存在虚拟碳流率贡献的上游虚拟节点集合; $R_{L, v_{\delta_b} - v_{\delta_q}, r}^{PT}$ 为第 r 轮分摊中上游虚拟节点 v_{δ_q} 对虚拟节点 v_{δ_b} 处虚拟负荷的虚拟碳流率贡献; $R_{L, v_{\delta_b}, r+1}^{PT}$ 和 $R_{L, v_{\delta_b}, r-1}^{PT}$ 分别为第 $r+1$ 轮和第 $r-1$ 轮虚拟节点 v_{δ_b} 处的虚拟碳流率。

4) 虚拟碳流率收敛性评估。根据式(25)在每一轮 DFS 追踪后得到虚拟节点下一轮更新后的虚拟碳流率 $R_{L, v_{\delta_b}, r+1}^{PT}$, 并且根据追踪结果计算并记录每轮虚拟节点集合 V_{δ} 的虚拟碳流率之和 $\text{sum}(R_{L, v_{\delta_b}, r}^{PT})$, 判断总虚拟碳流率 $\text{sum}(R_{L, v_{\delta_b}, r}^{PT})$ 是否小于系统收敛判据 η , 如果小于判据 η 则算法结束; 否则重新返回到步骤 3)。

输出每轮追踪分摊系统中所有上游虚拟节点对节点 v_m 所在负荷的虚拟碳流率贡献之和 $R_{L, v_m, r}^{PT}$ 以及联营交易下将网损碳排放归算至荷侧后购电用户应承担的碳排放责任 $R_{L\delta}^{PT}$ 。

$$R_{L, v_m, r}^{PT} = \sum_{V_{\delta_b}=1}^{\Omega_{upper, v_m}^{PT}} R_{L, v_{\delta_b} - v_m, r}^{PT} \quad (26)$$

$$R_{L\delta}^{PT} = \sum_{r=1}^{\Omega_{round}^{PT}} R_{L, v_m, r}^{PT} + R_{L, v_m}^{PT} \quad (27)$$

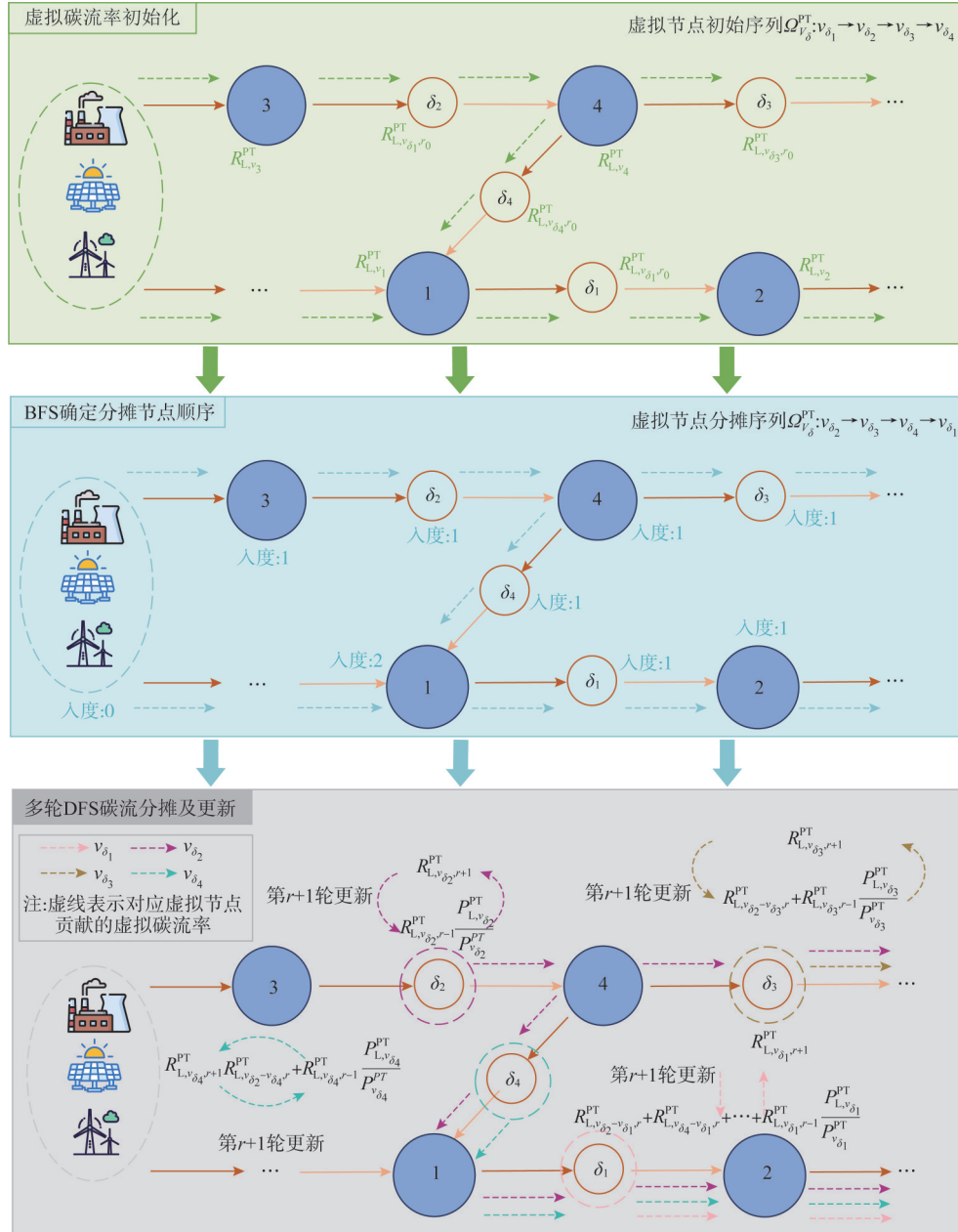


图5 虚拟碳流率追踪分摊示意图

Fig. 5 Schematic diagram of virtual carbon flow rate allocation and tracing

式中: Ω_{upper, v_m}^{PT} 为对节点 v_m 负荷存在虚拟碳流率贡献的上游虚拟节点集合; Ω_{round}^{PT} 为系统总虚拟碳流率迭代至收敛判据 η 时产生的总迭代轮数。

将双边交易网络和联营交易网络碳流路径追踪得到的结果进行叠加, 可以得到最终发电侧碳流率 R_g 以及最终负荷侧碳流率 R_L 。

$$R_g = R_{g\delta}^{BT} + R_{g\delta}^{PT} \quad (28)$$

$$R_L = R_{L\delta}^{BT} + R_{L\delta}^{PT} \quad (29)$$

4 算例分析

4.1 算例数据设置

本文采用改进的 IEEE 30 节点系统进行算例分析。本系统设置网损分配参数 γ 为 0.5, 收敛判据 η 设置为 $1 \times 10^{-3} \text{ kgCO}_2/\text{h}$ 。调用 MATPOWER 求解系统交流潮流, 将支路网损等效为虚拟节点, 实现有损网络向无损网络的转化, 并通过图论方法将母线、支路及有功潮流映射为节点、边和权值, 得到

无损潮流加权有向图如图 6 所示。

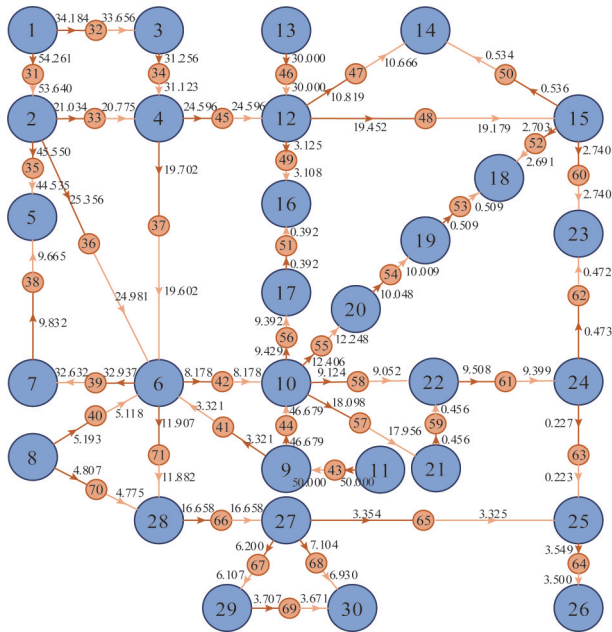


图 6 无损潮流加权有向图

Fig. 6 Lossless trend-weighted directed graph

为验证所提方法有效性, 设置 2 对双边交易如表 2 所示, BT1 为节点 1 火电机组 G1 与负荷 L12 的合同, BT2 为节点 2 风电机组 G2 与负荷 L15 的合同, 并设计以下 2 个场景进行对比。

场景 1: 使用常规的 Dinic 算法进行路径追踪, 获得其中的可行解。

场景 2: 使用本文所提的 LCP-Dinic 算法进行双边交易的碳流溯源, 得到低碳最优解。

表 2 双边交易说明

Tab. 2 Description of bilateral transactions

交易编号	发电节点	负荷节点	功率/MW
BT1	1	12	21.7
BT2	2	15	13.2

4.2 双边网络路径追踪结果分析

对第 2 节所提的双边交易网络碳流路径追踪进行求解, 可以得到多场景下双边交易对 BT1 和 BT2 的有功交易匹配量分布结果。如图 7 所示。

从图 7 可以看出, 发电机 G1 通过解得的碳流路径 1→32→3→34→4→45→12 满足双边合同 BT1; 发电机 G2 通过解得的碳流路径 2→33→4→45→12→48→15 满足双边合同 BT2。场景 1 交易 BT1 达成的匹配量为 21.2 MW, 刚好满足节点 12 负荷的功

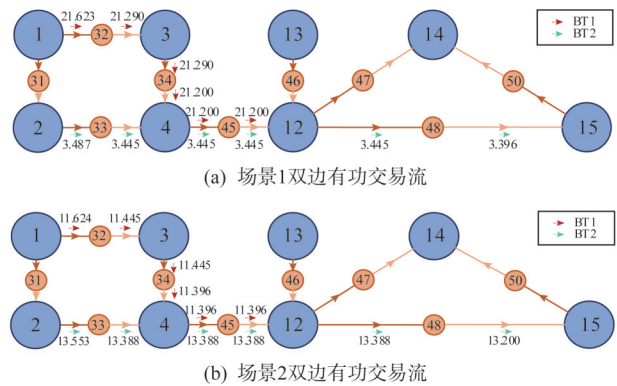


图 7 双边交易路径追踪结果

Fig. 7 The path-tracing results of the bilateral transaction

率需求; 场景 1 交易 BT2 达成的匹配量为 3.4 MW, 达成率为 25.76%, 远小于用户需求, 剩余的 9.8 MW 由节点 15 在联营市场中获取以满足自身需求以及源荷平衡。场景 2 交易 BT1 达成的匹配量为 11.4 MW, 达成率为 53.77%; 而 BT2 的交易合同则实现了完全匹配。从场景 1 到场景 2, 交易 BT1 的匹配量下降了 46.23%, 交易 BT2 的匹配量提升了 74.24%。这是因为最大流算法对 BT1 和 BT2 进行增流的过程中存在对共享路径 4→45→12 的竞争, 而场景 2 通过 LCP-Dinic 算法在路径增广阶段引入碳排放因子优先排序机制, 优先满足碳排放强度较低的交易对, 从而在物理交流潮流路径可行性的基础上, 实现更具用户低碳性的分配方案。

表 3 为双边交易下考虑网损碳排放双向分摊的碳流率计算结果。从表中可以看出。BT1 网损碳率之和由场景 1 中 359.597 kgCO₂/h 下降到场景 2 的 193.307 kgCO₂/h, 但是 BT2 网损碳率之和由 1.361 kgCO₂/h 增加至 5.289 kgCO₂/h。网损分摊后, 从场景 1 到场景 2, 交易发电侧火电机组 G1 承担碳排放由 179.799 kgCO₂/h 下降至 96.654 kgCO₂/h, 风电机组 G2 承担碳排放由 0.681 kgCO₂/h 上升至 2.645 kgCO₂/h, 而分摊后交易负荷侧 L12 和 L15 所需承担的碳排放由分别由 18 199.798 kgCO₂/h 降至 9 783.581 kgCO₂/h, 51.626 kgCO₂/h 增加至 200.645 kgCO₂/h。造成双向分摊后交易 BT2 源荷两侧所划分碳责任增加的原因本质上是由于在场景 2 中由于绿色双边交易匹配流增大的同时, 也会增加对绿色溯源碳流路径上网损的贡献。

4.3 联营网络路径追踪结果分析

分离双边交易后利用 DFS 对联营网络进行碳流

路径追踪与分解,可以得到任一机组与负荷、网损之间的所有碳流溯源路径以及每条路径所对应的碳流量分解量。表 4 为联营网络中各机组对系统实际负荷和网损的碳流率贡献统计,可以得到系统联营交易网络机组的总注入碳流率为 153 693.077 kgCO₂/h,而对网损的碳流率贡献为 3 079.794 kgCO₂/h,对实际负荷的碳流率贡献为 150 613.284 kgCO₂/h,即满足碳流守恒。

联营交易下场景 2 的实际负荷以及虚拟负荷碳流率计算结果如图 8 所示,从图中可以进一步明确实际负荷以及虚拟负荷的机组碳排放源。为了进一步分析联营市场下负荷碳流率的机组来源以及碳流路径的分布情况,这里以碳排放机组来源最为复杂的节点负荷 L5 为例,分析其碳流路径分布情况,L5 追踪结果如表 5 所示。从表中可以看出,共有 5

台发电机组作为碳源节点,并且通过 10 条可行碳流

路径向节点 L5 注入碳排放流。以 G1 为例,火电机组 G1 对 L5 的总碳流率贡献 24 927.783 kgCO₂/h 被分解到了 4 条碳流路径。通过路径回溯,G1 至 L5 每一条路径对应的碳流传输量均可清晰地刻画。

4.4 联营网络路径追踪结果分析

4.4.1 虚拟碳流率双向分摊分析

利用 3.3 小节所提的双向碳流分摊机制,系统首先通过 BFS 确定虚拟节点的分摊顺序,具体为:31→32→40→70→43→46→33→35→36→34→41→44→47→48→49→37→45→50→52→60→39→42→71→38→55→56→57→58→66→54→51→59→65→67→68→53→61→69→62→63→64。在每轮分摊

表 3 双边交易碳流率计算结果
Tab. 3 Bilateral transaction carbon flow rate calculation results

场景	kgCO ₂ /h							
	BT1 网损碳率之和	BT2 网损碳率之和	分摊后 G1 承担碳排放	分摊后 G2 承担碳排放	分摊前 L12 承担碳排放	分摊前 L15 承担碳排放	分摊后 L12 承担碳排放	分摊后 L15 承担碳排放
1	359.597	1.361	179.799	0.681	18 020.000	50.946	18 199.798	51.626
2	193.307	5.289	96.654	2.645	9 686.927	198.000	9 783.581	200.645

表 4 联营网络机组碳排率贡献统计
Tab. 4 Statistics on carbon emission rates contributed by units in the pool network

碳流率贡献类型	机组编号						综合
	G1	G2	G3	G4	G5	G6	
实际负荷碳流率贡献	63 164.588	686.878	20 000.000	21 836.562	27 206.548	17 718.707	150 613.284
网损碳流率贡献	2 326.489	15.122	0.000	163.438	293.452	281.293	3 079.794
总注入碳流率	65 491.077	702.000	20 000.000	22 000.000	27 500.000	18 000.000	153 693.077

表 5 负荷 L5 联营碳流率追踪结果
Tab. 5 Load L5 pool carbon flow rates tracking results

机组来源	路径编号	碳流路径	路径碳流率贡献/(kgCO ₂ ·h ⁻¹)	路径占机组总贡献比例/%	机组对 L5 总贡献碳流率/(kgCO ₂ ·h ⁻¹)
G1	1	1→31→2→33→4→37→6→39→7→38→5	450.029	1.805	24 927.783
	2	1→31→2→35→5	20 216.407	81.100	
	3	1→31→2→36→6→39→7→38→5	2 066.976	8.292	
	4	1→32→3→34→4→37→6→39→7→38→5	2 194.371	8.803	
G2	5	2→33→4→37→6→39→7→38→5	6.929	1.980	350.024
	6	2→35→5	311.270	88.928	
	7	2→36→6→39→7→38→5	31.825	9.092	
G3	8	5→5	20 000	100	20 000
G4	9	8→40→6→39→7→38→5	513.095	100	513.095
G5	10	11→43→9→41→6→39→7→38→5	332.934	100	332.934

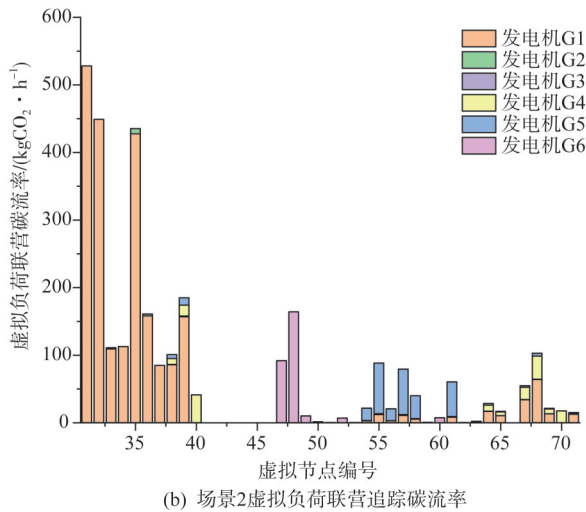
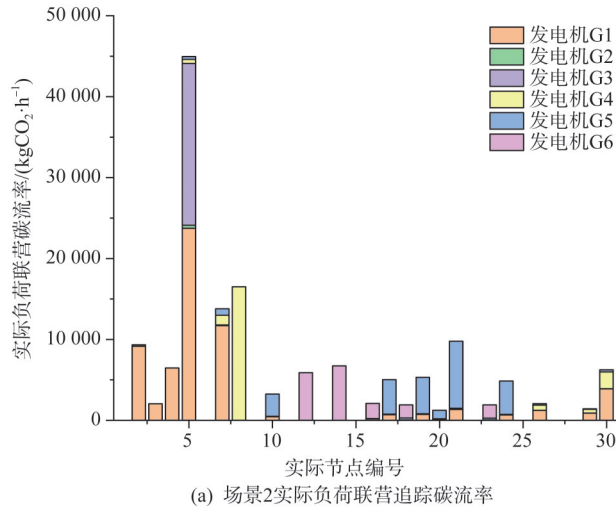


图8 场景2联营交易碳流率结果

Fig. 8 Carbon flow rate results for pool transactions in scenario 2

中,系统按上述顺序从虚拟节点31开始依次进行碳流率追踪与更新,直至遍历至末节点64。以虚拟节点31对负荷L5的第一轮分摊结果为例,如图9所示。虚拟节点31通过3条路径向L5注入2.577 kgCO₂/h、115.747 kgCO₂/h、11.834 kgCO₂/h的碳流率,并且向虚拟节点自身的虚拟负荷贡献了3.024 kgCO₂/h的碳流率以作为第二轮虚拟节点31进行DFS分摊的初始虚拟碳流率。

为直观展现虚拟碳流率分摊过程的收敛性与系统碳流率变化趋势,将每一轮结束后系统总虚拟碳流率绘制为迭代收敛曲线,如图10所示。从图中可以清晰看出,系统在第一轮迭代结束后,虚拟碳流率总量由1 539.867 kgCO₂/h骤降至27.227 kgCO₂/h,下降幅度高达98.23%。造成首轮迭代中

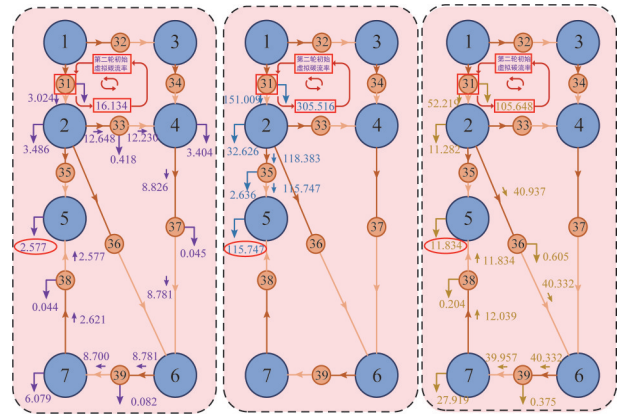


图9 虚拟节点31对负荷L5第一轮追踪分摊结果

Fig. 9 First-round tracking and allocation result of virtual node 31 for load L5

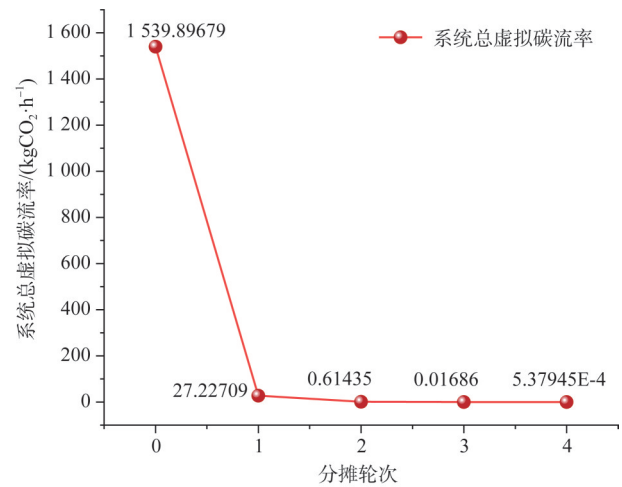


图10 系统总虚拟碳流率迭代曲线

Fig. 10 System total virtual carbon flow rates iteration curve

虚拟碳流大幅下降的主要原因在于:后续各轮迭代中的虚拟碳流率,主要来源于联营交易网络发电机注入至虚拟节点的初始碳流率在网络中的“二次再分摊”。由于该分摊过程是依据比例贡献原则在虚拟节点自身所对应的负荷上再次传导,而虚拟负荷本身规模较小,使得初轮分摊后的虚拟碳流率迅速锐减,导致后续轮次仅为微量调整,从而形成明显的快速收敛特征,验证了所提双向碳流分摊机制的有效性与稳定性。

4.4.2 最终负荷节点碳流率分析

将双边交易与联营交易的碳流率追踪结果叠加,并按双向分摊机制将联营网损碳流率分配至负荷侧后,得到各场景下混合市场中负荷节点的最终碳流率分布,如图11所示。

表6列出了L12和L15的最终碳流率及来源。

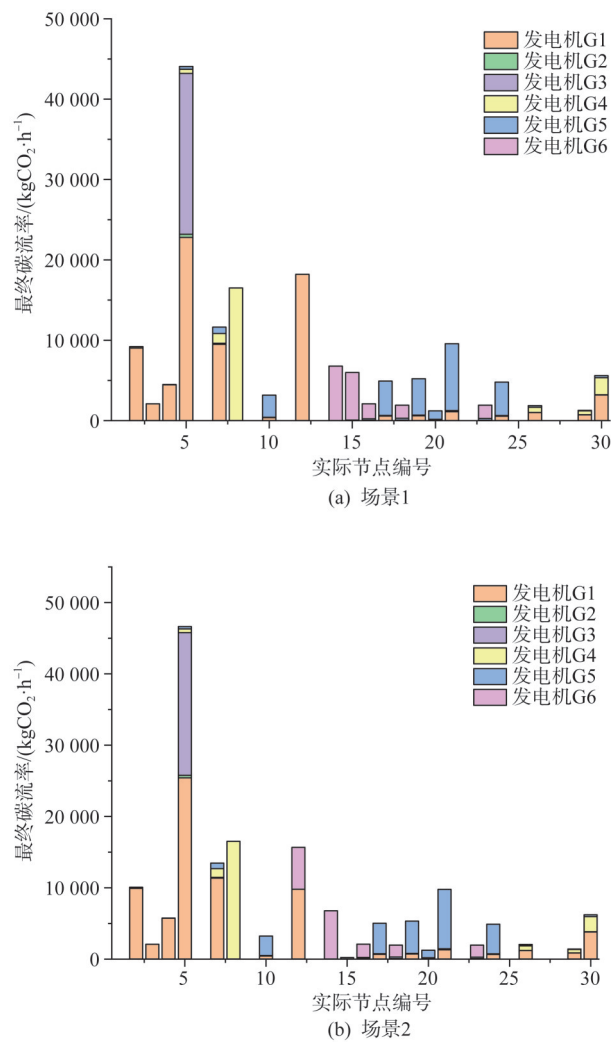


图 11 分摊后负荷最终碳流率
Fig. 11 Final load carbon flow rate after allocation

场景 1 中, L12 最终碳流率为 18 199.799 kgCO₂/h, 全部来自双边交易 BT1 的 G1; L15 为 5 984.779 kgCO₂/h, 其中 51.626 kgCO₂/h 来自 BT2 的 G2, 5 933.153 kgCO₂/h 来自联营交易的 G6。场景 2 中, L12 最终碳流率为 15 665.750 kgCO₂/h, 其中

9 783.581 kgCO₂/h 来自 BT1 的 G1, 5 882.169 kgCO₂/h 来自联营 G6; L15 为 200.645 kgCO₂/h, 全部来自 BT2 的 G2。

对比两场景, L12 碳流率下降 13.92 %, L15 下降 96.65 %, 其他负荷碳流率略有上升。这表明, 本文提出的碳核算方法与分摊机制能有效降低参与双边交易用户尤其是绿色交易用户的最终碳排放水平, 实现了低碳电力资源的精准引导和绿色消费激励, 为构建低碳友好、公平高效的电力市场提供了有力技术支撑。

5 结论

针对双边交易与联营交易并存的混合电力市场下碳排放路径追踪复杂、网损碳责任划分不清以及绿色交易低碳优先性不足等问题, 本文基于图论提出了一种面向低碳的碳排放溯源与网损双向分摊方法。首先, 通过构建虚拟无损网络实现双边与联营交易的解耦; 其次, 在双边交易子网络中引入碳排放因子优先机制的 LCP-Dinic 最大流算法, 实现低碳路径优先分配; 在联营交易子网络中设计“先 BFS 排序后 DFS 追踪”的双向碳流分摊机制, 实现源荷两侧网损碳责任的公平划分。

算例验证表明, 所提方法能够精准刻画混合市场碳流路径, 有效提升碳排放溯源的准确性、公平性与低碳导向性。仿真结果显示, 虚拟碳流率在首轮迭代中即可下降 98.23 %, 展现出良好的收敛效率和工程实用性。需要指出的是, LCP-Dinic 算法在实现低碳优先匹配的同时, 可能对高碳交易产生一定抑制作用。未来工作将进一步探索低碳优化与市场经济效率的协同机制, 为混合电力市场低碳转型提供更全面的技术支撑。

表 6 L12 和 L15 的最终碳流率
Tab. 6 Final carbon flow rates of L12 and L15

场景	节点负荷	最终碳流率/(kgCO ₂ ·h ⁻¹)	来自交易类型的碳流率			
			双边交易		联营交易	
			大小/(kgCO ₂ ·h ⁻¹)	占比/%	大小/(kgCO ₂ ·h ⁻¹)	占比/%
场景 1	L12	18 199.799	18 199.799	100.000	0	0
	L15	5 984.779	51.626	0.863	5 933.153	99.137
场景 2	L12	15 665.750	9 783.581	62.452	5 882.169	37.548
	L15	200.645	200.645	100.000	0	0

参考文献

- [1] 张智刚, 康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806 – 2819.
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806 – 2819.
- [2] 吴杏平, 康重庆, 袁启恒. 我国碳排放影响因素及电力碳排放核算方法研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(S1): 1 – 18.
WU Xingping, KANG Chongqing, YUAN Qiheng. A review of the impact factors of carbon emissions and the accounting methods for electricity carbon emissions in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(S1): 1 – 18.
- [3] 朱继忠, 周迦琳, 张迪. 清洁能源和电力系统碳足迹全生命周期核算综述[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(4): 1323 – 1343.
ZHU Jizhong, ZHOU Jialin, ZHANG Di. Review of full life-cycle carbon footprints accounting of clean energy and power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(4): 1323 – 1343.
- [4] GUO H, DAVIDSON M R, CHEN Q, et al. Power market reform in China: motivations, progress, and recommendations [J]. Energy Policy, 2020(145): 111717.
- [5] XU C, WEN F, PALU I. Electricity market regulation: global status, development trend, and prospect in China [J]. Energy Conversion and Economics, 2020, 1(3): 151 – 170.
- [6] 易俊, 孙浩然, 林伟芳, 等. 电力系统碳排放核算标准对比分析[J]. 电网技术, 2025, 49(3): 920 – 933.
YI Jun, SUN Haoran, LIN Weifang, et al. Comparative analysis of carbon emission accounting standards for power systems [J]. Power System Technology, 2025, 49(3): 920 – 933.
- [7] CHEN X, CHAO H, SHI W, et al. Towards carbon - free electricity: A flow-based framework for power grid carbon accounting and decarbonization [J]. Energy Conversion and Economics, 2024, 5(6): 396 – 418.
- [8] NASIR M, JORDEHI A R, TOSTADO-VÉLIZ M, et al. Two-stage stochastic-based scheduling of multi-energy microgrids with electric and hydrogen vehicles charging stations, considering transactions through pool market and bilateral contracts [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(61): 23459 – 23497.
- [9] YANG T, DANG Z, WANG X, et al. Comprehensive carbon accounting for power systems considering hybrid power trading mode [J]. Energy, 2025(1): 136897.
- [10] 刘天蔚, 边晓燕, 吴珊, 等. 电力系统碳排放核算综述与展望[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(4): 176 – 187.
LIU Tianwei, BIAN Xiaoyan, WU Shan, et al. Overview and prospect of carbon emission accounting in electric power systems [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(4): 176 – 187.
- [11] 张宁, 李姚旺, 黄俊辉, 等. 电力系统全环节碳计量方法与碳表系统[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(9): 2 – 12.
ZHANG Ning, LI Yaowang, HUANG Junhui, et al. Carbon measurement method and carbon meter system for whole chain of power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(9): 2 – 12.
- [12] 孙菁阳, 孔祥玉, 陈一, 等. 电力系统全环节碳排放核算方法综述[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(18): 1 – 13.
SUN Jingyang, KONG Xiangyu, CHEN Yi, et al. Review of carbon emission accounting methods for power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(18): 1 – 13.
- [13] 刘广一, 王继业, 汤亚宸, 等. 电网碳排放因子研究方向与应用需求的演变进程[J]. 电网技术, 2024, 48(1): 12 – 28.
LIU Guangyi, WANG Jiye, TANG Yachen, et al. Evolution process of research directions and application requirements of electricity carbon emission factors [J]. Power System Technology, 2024, 48(1): 12 – 28.
- [14] 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 – 2236.
LIU Yuliang, LI Yaowang, ZHOU Chunlei, et al. Overview of carbon measurement and analysis methods in power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(6): 2220 – 2236.
- [15] KANG C, ZHOU T, CHEN Q, et al. Carbon emission flow from generation to demand: a network-based model [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(5): 2386 – 2394.
- [16] 康重庆, 杜尔顺, 李姚旺, 等. 新型电力系统的“碳视角”: 科学问题与研究框架[J]. 电网技术, 2022, 46(3): 821 – 833.
KANG Chongqing, DU Ershun, LI Yaowang, et al. Key scientific problems and research framework for carbon perspective research of new power systems [J]. Power System Technology, 2022, 46(3): 821 – 833.
- [17] 芦新波, 赵良, 杨阳, 等. 分时分区电碳因子计算及其在产品碳足迹核算中的应用研究[J]. 中国工程科学, 2025, 27(5): 93 – 102.
LU Xinbo, ZHAO Liang, YANG Yang, et al. Calculation of time- and area-specific electric carbon factor and its application in product carbon footprint accounting [J]. Strategic Study of CAE, 2025, 27(5): 93 – 102.
- [18] 李汶龙, 周云, 罗棣, 等. 计及现货交易的电能交易全环节用电碳责任分摊[J]. 中国电力, 2024, 57(5): 99 – 112.
LI Wenlong, ZHOU Yun, LUO Ling, et al. Carbon allocation throughout the entire process of electric energy trading considering spot trading [J]. Electric Power, 2024, 57(5): 99 – 112.
- [19] 谢敏, 李弋升, 黄莹, 等. 零碳电力用户网购绿电消纳量测算方法及市场机制[J]. 南方电网技术, 2025, 19(2): 135 – 148.
XIE Min, LI Yisheng, HUANG Ying, et al. Calculation method and market mechanism of grid-sourced green electricity consumption for zero-carbon electricity consumers [J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(2): 135 – 148.
- [20] 吴琪, 赵宣茗, 张佳诚, 等. 考虑电-碳价格耦合的低碳需求响应研究[J]. 综合智慧能源, 2024, 46(10): 56 – 66.
WU Qi, ZHAO Xuanming, ZHANG Jiacheng, et al. Study on low-carbon demand response considering electricity-carbon price coupling [J]. Integrated Intelligent Energy, 2024, 46(10): 56 – 66.
- [21] 康重庆, 杜尔顺, 郭鸿业, 等. 新型电力系统的六要素分析[J]. 电网技术, 2023, 47(5): 1741 – 1750.
KANG Chongqing, DU Ershun, GUO Hongye, et al. Primary exploration of six essential factors in new power system [J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 1741 – 1750.
- [22] 刘广一, 戴仁昶, 路轶, 等. 电力图计算平台及其在能源互联网中的应用[J]. 电网技术, 2021, 45(6): 2051 – 2063.
LIU Guangyi, DAI Renchang, LU Yi, et al. Electric power graph computing platform and its application in Energy Internet

- [J]. Power System Technology, 2021, 45(6): 2051 – 2063.
- [23] 左伟林, 秦晓辉, 许彦平, 等. 基于图论的碳流网络分布和路径追踪算法研究[J]. 电网技术, 2025, 49(4): 1305 – 1315.
ZUO Weilin, QIN Xiaohui, XU Yanping, et al. Carbon flow network distribution and path tracing algorithm based on graph theory [J]. Power System Technology, 2025, 49(4): 1305 – 1315.
- [24] 杨挺, 党兆帅, 王旭东, 等. 混合交易模式下电力系统全环节碳排放核算方法[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(1): 38 – 52.
YANG Ting, DANG Zhaoshuai, WANG Xudong, et al. Carbon emission accounting method for the entire electricity system in the mixed trading model [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(1): 38 – 52.
- [25] 刘尧, 唐涛, 李卫东, 等. 考虑双边交易功率指向的潮流追踪算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 57 – 62.
LIU Riao, TANG Tao, LI Weidong, et al. Research on power flow tracking method considering the direction of bilateral contract power flows [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 57 – 62.
- [26] 徐祥海, 商佳宜, 赵天煜, 等. 考虑碳排放限制与市场参与的储能利润优化[J]. 中国电力, 2025, 58(3): 204 – 212.
XU Xianghai, SHANG Jiayi, ZHAO Tianyu, et al. Optimization of energy storage profit considering carbon emission constraints and market participation [J]. Electric Power, 2025, 58(3): 204 – 212.
- [27] 张妍, 冷媛, 尚楠, 等. 考虑碳排放需求响应及碳交易的电力系统双层优化调度[J]. 电力建设, 2024, 45(5): 94 – 104.
ZHANG Yan, LENG Yuan, SHANG Nan, et al. Bi-level optimal scheduling of power system considering carbon demand response and carbon trading [J]. Electric Power Construction, 2024, 45(5): 94 – 104.
- [28] 马喜平, 贾嵘, 梁琛, 等. 高比例新能源接入下电力系统降损研究综述[J]. 电网技术, 2022, 46(11): 4305 – 4315.
MA Xiping, JIA Rong, LIANG Chen, et al. Review of researches on loss reduction in context of high penetration of renewable power generation [J]. Power System Technology, 2022, 46(11): 4305 – 4315.
- [29] 马超, 秦晓辉, 刘晓瑞, 等. 新型电力系统电碳协同研究综述: 量化方法、关键技术与应用展望[J]. 高电压技术, 2026, 52(1): 193 – 214.
MA Chao, QIN Xiaohui, LIU Xiaorui, et al. Review of research on electricity carbon collaboration in new type power systems: quantitative methods, key technologies and application prospects [J]. High Voltage Engineering, 2026, 52(1): 193 – 214.

收稿日期: 2025-09-08; 网络首发日期: 2026-05-25

作者简介:

张佳诚(2001), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力市场与碳计量, 234612235@csu.edu.cn;

赵宣茗(1994), 男, 博士研究生, 研究方向为工业过程控制、低碳制造和电碳市场, zhaoxm@csu.edu.cn;

袁智峰(1979), 女, 通信作者, 副教授, 博士生导师, 博士, 研究方向为人工智能、电力经济、电力市场及其新能源接入, Zhifeng.qiu@csu.edu.cn。

广 告

积成电子股份有限公司 A2

长园深瑞继保自动化有限公司 A3

北京四方继保自动化股份有限公司 A4