

计及混合交易模式的多区域互联电力系统 碳排放流计算方法

唐爱红¹, 余文晗¹, 张莹², 瞿子涵², 王庆铭¹, 王文浩¹

(1. 武汉理工大学自动化学院, 湖北省 武汉市 430070;

(2. 国网湖北省电力有限公司电力科学研究院, 湖北省 武汉市 430077)

Calculation Method of Carbon Emission Flow in Multi-regional Interconnected Power System Considering Hybrid Trading Mode

TANG Aihong¹, YU Wenhan¹, ZHANG Ying², QU Zihan², WANG Qingming¹, WANG Wenhao¹

(1. School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei Province, China;

2. Electric Power Research Institute, State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430077, Hubei Province, China)

ABSTRACT: To clarify the influence of hybrid transactions among sub-regions on the carbon flow distribution in multi-region interconnected power systems, this paper proposed a calculation method of carbon emission flow in multi-regional interconnected power systems with the hybrid trading model. Firstly, the split method is adopted to transform the original multi-region interconnected power system into an intuitive bilateral trading system. Then, according to the trend tracking method, the joint transaction is equivalent to multiple virtual bilateral transactions, the network loss is divided into each transaction successfully, and the bilateral transaction network and the joint transaction network are decoupled. Then, according to the characteristics of each transaction, the operating parameters of the new transaction network are obtained. The branch and load carbon flow rates in each network are calculated, respectively. Then, the carbon flow distribution of the original multi-regional interconnection system is calculated. The example results show that compared with the traditional carbon flow calculation method, the above method can reflect the influence of different hybrid trading modes on the carbon flow distribution of the system, effectively avoid the "carbon leakage" caused by different transaction coupling, and can show the carbon emission composition information to power users, which has high practical value.

KEY WORDS: multi-regional interconnection; trading mode; carbon flow rate; carbon flow distribution

摘要: 为理清在多区域互联系统中各子区域间的混合交易对

碳流分布的影响, 该文提出了一种计及混合交易模式的多区域互联电力系统碳排放流计算方法。首先采用分裂法思想, 将原多区域互联电力系统转化为直观的双边交易系统。再根据潮流追踪法, 将联营交易等效为多笔虚拟双边交易, 成功将网损分至每笔交易, 实现双边交易网络与联营交易网络的解耦。然后根据每笔交易的特性, 得出新交易网络的运行参数, 分别计算出各网络中的支路碳流率与负荷碳流率, 进而计算出原多区域互联系统的碳流分布。算例结果显示, 与传统的碳流计算方法相比, 上述方法能够反映出不同混合交易模式对系统碳流分布的影响, 有效地避免不同交易耦合所造成的“碳泄露”, 并能向电力用户展示碳排放的构成信息, 具有较高的实用价值。

关键词: 多区域互联; 交易模式; 碳流率; 碳流分布

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2024.0095

0 引言

随着“双碳”目标的提出, 作为我国碳排放市场的主力军, 电力行业向低碳化转型的趋势不可避免^[1]。在转型过程中, 电网中各区域风电、光伏等清洁分布式电源渗透率及发电量飙升^[2-3], 伴随各区域间电力交易的规模与类型不断扩大^[4], 导致电力系统的碳排放来源构成变得复杂化。在以往的多区域间混合电力交易的过程中, 通常认为交易产生的碳排放只会存在于发电环节, 电能的输送与分配使用并不会产生碳排放, 若要发电环节承担所有的碳排放责任, 是十分不公平的。

实际上, 负荷作为交易量的实际消纳方, 也应当承担相应的碳排放责任。尤其在计及混合交易模式时, 需理清不同交易对系统碳流分布的影响。但目前电能的生产侧与消费侧处于割裂运行状态, 这

基金项目: 湖北省重点研发计划项目(2023BAB111)。

Project Supported by the Key R&D Program of Hubei Province (2023BAB111).

不利于交易双方合理分摊碳排放责任。因此，为加速电力行业向低碳化转型的过程，构建电碳协同统一控制市场，亟需提出一种公平合理的计及混合交易模式的多区域互联电力系统碳流计算方法。

传统的碳排放分析方法包括宏观统计法^[5-6]和全生命周期法，这两种方法不能准确地表征出碳排在电力网络中的流向^[7]，并且计算结果存在一定的滞后性，无法细致描述电力市场中各项碳指标的微观变化，也无法公平地进行生产侧与消费侧碳排放责任的分摊。因此文献[8-10]提出了一种基于比例分摊的碳流计算方法，该方法基于直流潮流的结果，用于计算电力系统碳排放流，清楚地揭示了碳流在电力网络中的流向，推动了碳流计算的发展。但此类方法对存在能量耦合的电力系统进行碳排放流计算时不适用，并且未考虑到多种交易模式对电力系统碳流分布的影响，存在较大的局限性。文献[11]将潮流追踪从有功潮流追踪拓展为复功率潮流追踪，可以计算考虑网损的电力系统碳流分布。文献[12]基于节点碳势计算，提出电力系统碳流计算的递推算法，并与文献[10]提出的方法结合，提出了协同计算流程。文献[13]则依据节点导纳矩阵，在确定的潮流结果上，实现了碳排放流追踪的解析算法，得到用户侧、发电侧与线路侧3种计量方式下系统碳排放量的计量结果。

现有的电力市场交易根据参与主体与交易方式的不同，可分为联营交易与双边交易两类。联营交易是发电侧与用户侧联合运营，把电网当做联营交易的中心。双边交易为发电侧与用户侧之间直接签订电力交易的协定，协定需规定好交易双方的供需电量等条件。当不同类型的交易同时存在于一个电力网络时，即为混合交易网络。基于比例分摊的碳流计算依据潮流跟踪虽实现了用户侧碳排放的溯源^[14-15]，但当用户与发电商直接签订双边协定时，用户的电力碳排放消费构成信息将无法被区分开，各笔电力交易造成的碳排放责任分摊不明确，并且各笔交易的存在也会使碳流计算的处理变得复杂。文献[16]证明了当一个复杂网络包含多种交易模式时，因为网损的存在，整个系统并不是线性，即每笔交易单独作用于系统时产生的网损之和并不等于所有交易共同作用于系统产生的总网损。文献[17]考虑了混合交易模式对碳排放流的影响，运用潮流跟踪法实现将网损分至不同交易，并对负荷碳流率进行了计算分析，但此解耦方法并未将原混合交易网络解耦为联营交易网络与双边交易网络，无法分析每笔交易对整个系统的碳流分布的影响。

文献[18]从碳排放流理论出发，将网损等效为支路潮流源节点上的负荷，将非交易电量与交易电量进行拆分，分别计算了对应的用户间接碳排放责任。但交易电量未被解耦转化为联营交易电量与双边交易电量，不能体现不同交易对用户碳排放责任的影响。文献[19]从负荷侧出发，建立了碳流溯源分析方法，进而提出考虑绿电的双边交易等效模型，实现了绿电交易的碳抵扣效应。但当网络中存在联营交易时，该用户侧核算方法将不再适用。文献[20]基于潮流跟踪法，根据日前、日内网络的相关参数，提出了一种基于网络分解的碳流实时计算方法，实现了网损的双向分摊。但此计算模型仍未考虑当混合交易模式同时存在一个系统时，如何实现多种交易模式间的解耦以及不同交易网络的碳流计算。在涉及混合交易模式的电力系统碳流分布计算时，各笔交易间存在网损耦合项，使碳流计算难以进行。同时，在网损分至每笔交易后，仍无法准确地计算出不同交易网络所造成的碳流分布与原网络的碳流分布，这些问题就给传统的电力系统碳流分析方法提出了新挑战。

鉴于以上不足，为理清在多区域互联系统中各子区域间的混合交易对系统碳流分布的影响。本文提出了一种计及混合交易模式的多区域互联电力系统碳排放流计算方法，来解决存在多种跨区交易时系统碳流分布的问题。混合交易包括联营交易与双边交易两种交易模式，先将联营交易等效成多笔虚拟双边交易，运用分裂法解决区内交易与跨区交易的网损分摊；再根据交易的类型，分别建立联营交易网络与双边交易网络，并进行不同交易网络的碳流分布计算，从而解决不同交易耦合导致负荷碳流率来源不清、跨区碳流分布无法量化等问题。最后，以IEEE14节点系统为例，计算该多区域互联系统的碳流分布，算例结果显示，与传统的碳流计算法相比，本文方法能够反映出不同混合交易模式对系统碳流分布的影响，有效地避免不同交易耦合所造成的“碳泄露”，具有较高的实用价值。

1 双边交易网络碳流计算方法分析

双边交易是发电商与用户两方直接签订协议，交易双方明确，但交易量在系统的流向并不清晰，导致整个双边交易系统的碳流流向与参与双边交易的用户侧碳流率无法量化。文献[21-22]提出基于网络分裂法的双边交易网损分摊方法，能够理清每笔双边交易在支路潮流中所占份额。本文在此基础上根据多区域互联电力系统的潮流结果，计算混合

交易网络中双边交易网络的碳流分布。

1.1 双边交易的无损网络构建

若多区域互联系统的具体网架结构如图 1(a)所示, 将原系统按照图 1(b)的方式, 划分为 A、B、C 这 3 个区域, 假设该系统中存在的 n 笔双边交易 $\mathbf{B}=[B_1, B_2, \dots, B_n]^T$ 。

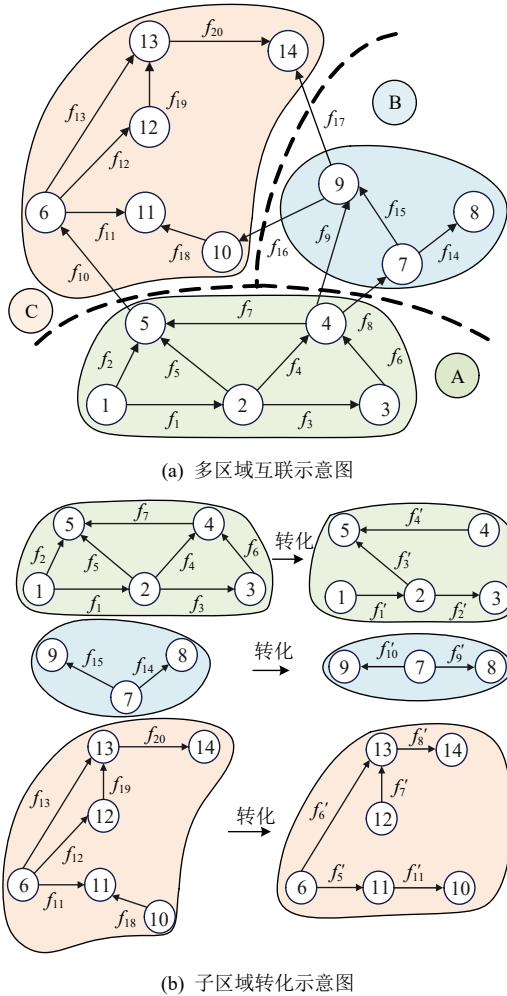


图 1 多区域互联与子区域转化示意图

Fig. 1 Schematic diagram of multi-regional interconnected and sub-regional transformation

各子区域内部处理后, 去掉多余联络线。得到原始潮流分布 \mathbf{F}_1 和交易引起的潮流分布 \mathbf{F}_2 的关系。

$$\mathbf{F}_1 = \mathbf{C}_a \mathbf{F}_2 \quad (1)$$

式中: \mathbf{C}_a 为支路关联矩阵; \mathbf{F}_2 为仅包含子区域内的双边交易与跨区双边交易在网络分裂后系统支路上形成的潮流。

因网络分裂后系统子区域内仅存在树支, 区域间仅存在唯一的联络线, 交易量流向确定, 即:

$$\mathbf{F}_2 = \mathbf{C}_b \mathbf{B} \quad (2)$$

式中: \mathbf{C}_b 表示交易关联矩阵。

根据上述方法得到直观的仅包含双边交易的多区域互联系统, 但当原系统存在混合交易时, 即

系统中不仅存在双边交易还存在联营交易, 上述方法将不再适用。

设该多区域互联系统存在 l 条支路、 m 个发电机组, 每条支路的损耗为 $P_{\text{loss},j}(j=1, \dots, l)$, 系统中同时存在 n 笔双边交易与联营交易, n 笔双边交易的交易量表示为 $\mathbf{B}=[B_1, B_2, \dots, B_n]^T$ 。由于上文所述方法仅适用于存在双边交易的系统, 对存在混合交易的系统并不适用, 因此本文提出将多区域互联系统中的联营交易转化为 s 笔虚拟双边交易, 具体处理方法将在第 2.1 节详细阐述。

处理后的多区域互联系统仅包含 $(n+s)$ 笔双边交易, 各支路潮流与各笔双边交易的关系为

$$\mathbf{F}_1 = \mathbf{C}_{cb} \mathbf{B} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{C}_{cb}=\mathbf{C}_a \mathbf{C}_b$, 表示支路交易关联矩阵, 为 $l \times (n+s)$ 阶矩阵。

令 $\mathbf{B}_{f,i}=[0, \dots, B_i, \dots, 0]^T$ 为第 i 个元素为第 i 笔双边交易的交易量, 其余元素为 0 的 $(n+s)$ 维列向量; $\mathbf{C}_{cb,j}$ 为 \mathbf{C}_{cb} 矩阵的第 $j(j=1, \dots, l)$ 行的 $(n+s)$ 维行向量。每笔双边交易分摊的网损为

$$\Delta B_i = \sum_{j=1}^l \frac{\mathbf{C}_{cb,j} \mathbf{B}_{f,i} P_{\text{loss},j}}{\mathbf{C}_{cb,j} \mathbf{B}} \quad (4)$$

1.2 双边交易网络的碳流计算方法

将每条支路上的损耗分给对应交易后, 混合交易网络按图 2 所示解耦为双边交易网络与联营交易网络。图 2 中: 前两个负荷代表混合交易网络负荷, 第三个负荷代表联营交易网络负荷, 第四个负荷代表双边交易网络负荷。其中双边交易网络各线路参数和网络结构与原混合交易网络保持一致。由于双边交易合同双方明确, 交易电量确定, 因此双边交易网络中发电机的有功出力和负荷的有功需求与双边交易协定保持一致, 具体参数如式(5)所示。

$$\begin{cases} P_{G1}^B = \sum_{i=1}^n \Delta B_i + \sum_{G1 \in B_n} B_i \\ P_{G2,j}^B = \sum_{G2,j \in B_n} B_i \\ L_{Di}^B = \sum_{Di \in B_n} B_i \\ \boldsymbol{\varepsilon}_G^B = \boldsymbol{\varepsilon}_G \end{cases} \quad (5)$$

式中: $P_{G1}^B, P_{G2,j}^B, L_{Di}^B$ 分别代表双边交易网络中平衡机组的有功出力、非平衡机组的有功出力与负荷的有功需求; B_n 代表双边交易的集合; B_i 代表第 i 笔双边交易的交易量; $\boldsymbol{\varepsilon}_G, \boldsymbol{\varepsilon}_G^B$ 分别代表原网络与双边交易网络的机组碳排放强度。

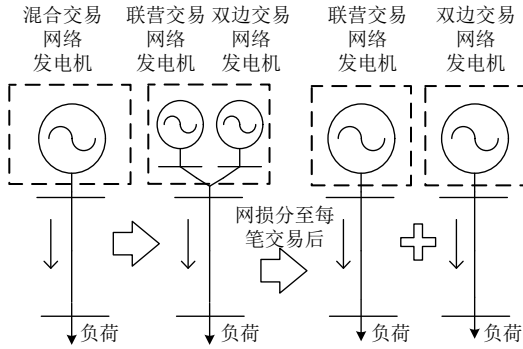


图2 混合交易网络的解耦等效模型

Fig. 2 Decoupling equivalent model of hybrid trading network

双边交易的交易双方确定，网损按照合同规定的分摊系数 δ 公平地分摊给合同双方。

调整后双边交易网络的发电机的有功出力与负荷的有功需求为

$$\begin{cases} P_{G_i}^{\text{B,after}} = P_{G_i}^{\text{B}} - \delta \sum_{G_i \in B_n} \Delta B_i \\ L_{D_i}^{\text{B,after}} = L_{D_i}^{\text{B}} + (1-\delta) \sum_{i \in B_n} \Delta B_i \end{cases} \quad (6)$$

式中： $P_{G_i}^{\text{B,after}}$ 、 $L_{D_i}^{\text{B,after}}$ 分别代表调整后双边交易网络的发电机的有功出力和负荷的有功需求。

双边交易网络的净发电量与负荷的净受入量已知，且网络中的线路参数保持不变，可通过直流潮流的计算方法重新计算出双边交易网络的直流支路潮流分布矩阵 P_D^{B} ，机组注入分布矩阵 $P_G^{\text{B,after}}$ 与负荷分布矩阵 $L_D^{\text{B,after}}$ ，并根据文献[8-10]所述方法得到节点有功注入矩阵 P_N^{B} 。

根据双边交易网络的节点有功注入矩阵 P_N^{B} ，直流支路潮流分布矩阵 P_D^{B} 与机组注入分布矩阵 $P_G^{\text{B,after}}$ 可得出各节点的节点碳势。

$$\boldsymbol{\varepsilon}_N^{\text{B}} = [P_N^{\text{B}} - (P_D^{\text{B}})^{\text{T}}]^{-1} (P_G^{\text{B,after}})^{\text{T}} \boldsymbol{\varepsilon}_G^{\text{B}} \quad (7)$$

得到节点碳势后，可进一步求得双边交易网络的碳流分布。

$$\begin{cases} \mathbf{R}_L^{\text{B}} = L_D^{\text{B,after}} \boldsymbol{\varepsilon}_N^{\text{B}} \\ \mathbf{R}_G^{\text{B}} = \text{diag}(\boldsymbol{\varepsilon}_N^{\text{B}}) P_D^{\text{B}} \end{cases} \quad (8)$$

式中： \mathbf{R}_L^{B} 、 \mathbf{R}_G^{B} 代表双边交易网络的负荷碳流率分布矩阵与支路碳流率分布矩阵。

2 联营交易网络碳流计算方法分析

在第1节中，已将原混合交易网络解耦为双边交易网络与联营交易网络，并对双边交易网络的碳流分布进行了分析与计算，但未对如何将联营交易转化为多笔虚拟双边交易的方法进行分析，现对此方法进行详细阐述，并给出混合交易网络中联营交易网络的碳流分布计算方法。

2.1 虚拟双边交易

假设一个存在混合交易的 a 节点系统存在 n 笔双边交易： $B_1(G_{1B}, L_{D,1B}), \dots, B_M(G_{NB}, L_{D,NB})$ 和联营交易，即系统存在 $n+1$ 笔交易。在原系统的直流潮流中，除去双边交易后，剩下的联营交易为

$$\begin{cases} G_{mL} = G_m - G_{mB} \\ L_{D,mL} = L_{D,m} - L_{D,mB} \end{cases} \quad (9)$$

式中： G_{mL} 、 $L_{D,mL}(m=1, \dots, a)$ 表示联营交易系统中节点 m 的发电量与负荷量； G_m 、 $L_{D,m}$ 表示原系统中节点 m 的发电量与负荷量。

由式(5)(6)(9)，得到每笔虚拟双边交易的交易电量。

$$B_{n+i} = \frac{(L_{D,k} - L_{D,kB})(G_j - G_{jB})}{P_k} \mathbf{e}_k^{\text{T}} \mathbf{A}_u^{-1} \mathbf{e}_j \quad (10)$$

式中： \mathbf{A}_u 为上游分布矩阵； P_k 为节点 k 流过的功率； $\mathbf{e}_j \in \mathbf{R}^n$ ，为第 j 个变量为 1，其余变量为 0 的列向量； B_{n+i} 为第 i 笔虚拟双边交易的交易电量； k, j 分别为联营交易网络中接入负荷与发电机的节点。由式(10)确定出虚拟双边交易的交易电量，原系统也变为只存在 $n+s$ 笔双边交易的系统(其中，第 $n+1$ 笔至第 $n+s$ 笔为虚拟双边交易)。处理后的系统因只存在双边交易，能够较简单得将网损分在每笔双边交易上，从而实现混合交易模式的解耦。

2.2 联营交易网络的碳流计算方法

将联营交易转化为 s 笔虚拟双边交易后，根据式(4)可得，联营交易需要承担的总网损为

$$\Delta T = \sum_{i=n+1}^{n+s} \sum_{j=1}^i \frac{C_{cb,j} \mathbf{B}_{f,i} P_{\text{loss},j}}{C_{cb,j} \mathbf{B}} \quad (11)$$

联营交易网络各线路参数和网络结构与原系统保持一致。由于联营交易通过电力库进行交易，交易双方并不明确，将双边交易网络解耦后，原混合交易网络剩下的交易电量为联营交易的交易电量。因此联营交易网络中发电机的有功出力和负荷的有功需求为

$$\begin{cases} P_{G1}^{\text{T}} = P_{G1} - \sum_{G1 \in B_n} B_i + \Delta T \\ P_{G2,j}^{\text{T}} = P_{G2,j} - P_{G2,j}^{\text{B}} \\ L_{D_i}^{\text{T}} = L_{D_i} - L_{D_i}^{\text{B}} \\ \boldsymbol{\varepsilon}_G^{\text{T}} = \boldsymbol{\varepsilon}_G \end{cases} \quad (12)$$

式中： P_{G1}^{T} 、 $P_{G2,j}^{\text{T}}$ 、 $L_{D_i}^{\text{T}}$ 分别代表联营交易网络中平衡机组的有功出力、非平衡机组的有功出力与负荷的有功需求； P_{G1} 、 $P_{G2,j}$ 、 L_{D_i} 分别代表原多区域互联系统中平衡机组的有功出力、非平衡机组的有功

出力与负荷的有功需求； $\boldsymbol{\varepsilon}_G^T$ 代表联营交易网络的机组碳排放强度。

由于联营交易的交易双方并不明确，交易双方间通过电网进行联系，网损无法按照交易合同规定的分摊系数进行分摊。因此本文按照第2.1节虚拟双边交易的方法，将网损平等地分给虚拟双边交易的交易双方。调整后联营交易网络中发电机的有功出力和负荷的有功需求为

$$\begin{cases} P_{Gi}^{T,after} = P_{Gi}^T - 0.5 \sum_{G_i \in B_s} \Delta B_i \\ L_{Di}^{T,after} = L_{Di}^T + 0.5 \sum_{i \in B_s} \Delta B_i \end{cases} \quad (13)$$

式中： $P_{Gi}^{T,after}$ 、 $L_{Di}^{T,after}$ 分别代表调整后联营交易网络的发电机的有功出力和负荷的有功需求； B_s 代表虚拟双边交易的集合。

同理，根据联营交易网络的节点有功注入矩阵 \boldsymbol{P}_N^T ，直流支路潮流分布矩阵 \boldsymbol{P}_D^T 与机组注入分布矩阵 $\boldsymbol{P}_G^{T,after}$ 可得出联营交易网络的各节点碳势 $\boldsymbol{\varepsilon}_N^T$ 。

$$\boldsymbol{\varepsilon}_N^T = [\boldsymbol{P}_N^T - (\boldsymbol{P}_D^T)^T]^{-1} (\boldsymbol{P}_G^{T,after})^T \boldsymbol{\varepsilon}_G^T \quad (14)$$

得到节点碳势后，可进一步求得联营交易网络的碳流分布。

$$\begin{cases} \boldsymbol{R}_L^T = \boldsymbol{L}_D^{T,after} \boldsymbol{\varepsilon}_N^T \\ \boldsymbol{R}_b^T = \text{diag}(\boldsymbol{\varepsilon}_N^T) \boldsymbol{P}_D^T \end{cases} \quad (15)$$

式中： \boldsymbol{R}_L^T 、 \boldsymbol{R}_b^T 代表联营交易网络的负荷碳流率分布矩阵与支路碳流率分布矩阵； $\boldsymbol{L}_D^{T,after}$ 代表联营交易网络的负荷分布矩阵。

3 原多区域互联系统的碳流计算

将多区域互联系统的各个子区域并行处理，形成双边交易流向确定的等效网络。根据双边交易规定的合同流向，将多区域互联系统中各支路潮流转化为各笔双边交易的确定组合。由于支路的有功损耗与有功潮流成正比，根据式(3)(4)可将网损分至每笔双边交易中。联营交易通过电网交易，并没有明确交易双方^[23]。应用潮流跟踪法，可以实现负荷电量来源的“溯源”。运用式(9)与式(10)将联营交易转化为多笔虚拟双边交易，再根据式(11)得到联营交易需要承担的网损。

将系统网损分至各笔交易后，原多区域互联系统解耦为双边交易网络与联营交易网络，双边交易网络与联营交易网络的运行参数分别由式(5)和式(12)计算得出。根据新交易网络的潮流结果，分别按式(7)(8)与式(14)(15)计算出双边交易网络与联营交易网络的碳流分布。由于两交易网络已不存在耦合项，则原多区域互联系统的负荷碳流率分布与

支路碳流率分布为

$$\begin{cases} \boldsymbol{R}_L = \boldsymbol{R}_L^B + \boldsymbol{R}_L^T \\ \boldsymbol{R}_b = \boldsymbol{R}_b^B + \boldsymbol{R}_b^T \end{cases} \quad (16)$$

式中： \boldsymbol{R}_L 、 \boldsymbol{R}_b 分别代表原系统的负荷碳流率分布矩阵与支路碳流率分布矩阵。但需要注意的是：两个网络的支路碳流率分布矩阵在相加时，支路碳流率方向的改变可能会导致负值出现。将混合交易网络拆分为双边交易网络与联营交易网络，分别进行碳流计算再相加，可以有效地避免不同交易耦合所造成的“碳泄露”，并理清了不同交易对系统碳流分布的影响。但由式(14)可知，整个网络的节点碳势 E_N 不能由拆分后的两个网络线性组合得出。

由于各节点的节点碳势仅与注入碳流率与注入潮流有关，因此根据双边交易网络与联营交易网络计算出的各支路碳流率，再结合原混合交易网络上各节点流过的有功功率，得出混合交易网络中节点 n 的节点碳势如式(17)所示：

$$E_N = \frac{\sum_{i \in N^+} r_{b,i}^T + \sum_{i \in N^+} r_{b,i}^B + \sum_{G \in N^+} P_G \boldsymbol{\varepsilon}_G}{\sum_{i \in N^+} P_b + \sum_{G \in N^+} P_G} \quad (17)$$

式中： N^+ 表示与节点 n 相连且有有功潮流注入的所有支路的集合； i 代表支路； G 代表发电机； P_b 代表与节点 n 相连的支路注入的有功功率； $r_{b,i}^T$ 、 $r_{b,i}^B$ 代表联营交易网络与双边交易网络中支路 i 的支路碳流率； P_G 代表与节点 n 相连的发电机的出力。

用图3所示的流程图详尽地表示混合交易网络

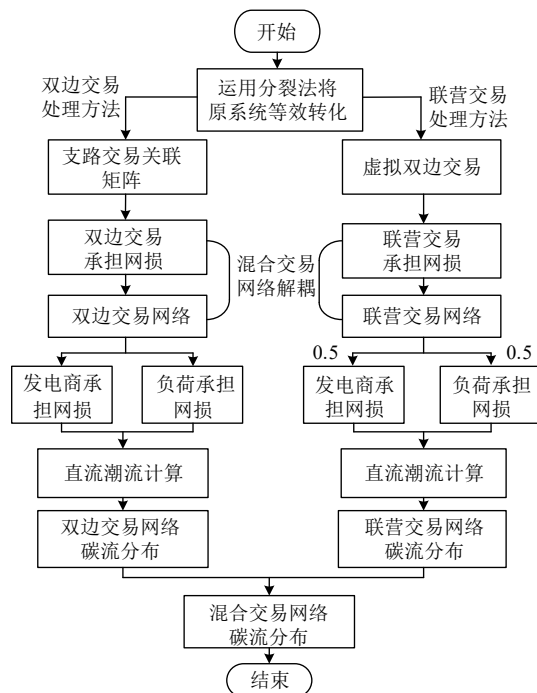


图3 多区域互联系统的碳流计算流程图
Fig. 3 Carbon flow calculation flow chart of multi-regional interconnected system

联营交易网络与双边交易网络3种交易网络的计算过程。

4 算例分析

为验证计及混合交易模式的多区域互联电力系统碳排放流计算方法的正确性，本文选用第 1.1 节中图 1(a)所示的 IEEE14 节点系统为算例^[24]，并将该系统按图 1(b)所示的划分方法将原多区域互联系统分成 A、B、C 区，进行碳流分布计算。该系统中存在 5 个发电商；节点 1 为整个多区域互联系统的平衡节点，发电商为水电机组，碳排放强度较低^[25]；节点 2，8 为系统中的 PV 节点，发电商为燃气机组^[26]，碳排放强度较高；节点 6 为系统的 PV 节点，发电商为燃煤机组^[27]，碳排放强度高；节点 3 为系统中的 PV 节点，并此处接入一座风电场，碳排放强度较低^[25]。各机组的具体出力与机组碳排放强度如表 1 所示。

发电机节点编号	节点类型	机组出力/MW	机组碳排放强度/(gCO ₂ /(kW·h))
1	平衡节点	80	10
2	PV 节点	100	500
3	PV 节点	50	5
6	PV 节点	50	800
8	PV 节点	190	600

该多区域互联系统存在 5 笔双边交易和 1 笔联营交易。发电商 1 与用户 4、发电商 8 与用户 9、发电商 6 与用户 10 分别签订区内双边交易，交易电量为 80、90、50MW。发电商 2 与用户 7，发电商 8 与用户 14 签订跨区双边交易，交易电量均为 50MW，且每笔双边交易的网损分摊系数 δ 均为 0.5。发电商与用户的其他交易电量均属于联营交易的电量，各发电商参与不同混合交易的程度见图 4。

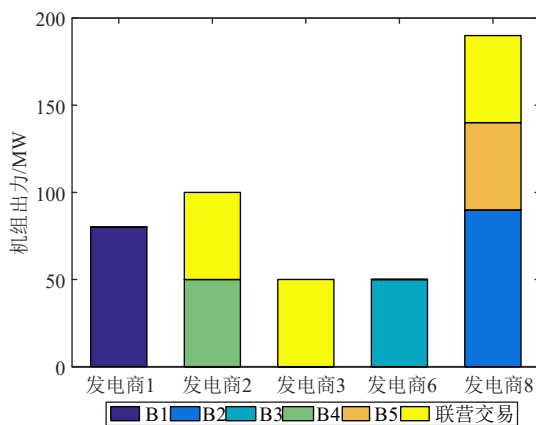


图 4 各发电商参与不同混合交易的程度

Fig. 4 Extent to which each generator participates in different mixed transactions

根据 2.1 节虚拟双边交易中所讲述的处理方法，将原多区域互联系统中剩下的联营交易转化为 7 笔虚拟双边交易。发电商 2、发电商 3、发电商 8 作为参与联营交易的发电商，将联营交易等效为 7 笔虚拟双边交易后，3 个发电商参与每笔虚拟双边交易的程度如图 5 所示。

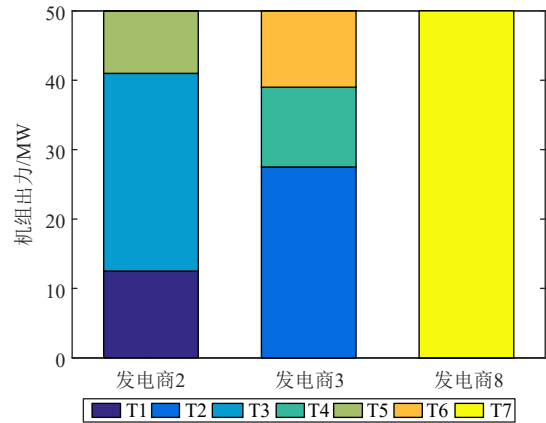


图 5 参与联营交易发电商各虚拟双边交易出力
Fig. 5 Each virtual bilateral transaction output of participating in joint trading power generators

调用 Matlab 中 MATPOWER6.0 对多区域互联电力系统进行潮流计算，得到该多区域互联系统的潮流分布。处理后的多区域互联系统中存在 5 笔双边交易和 7 笔虚拟双边交易，根据不同类型的交易在每条支路有功潮流中所占份额。计算出每笔双边交易和虚拟双边交易所分摊的网损量，并与各笔的实际交易量对比。

首先，从图 6 中可以看出 B 区内双边交易 B2，跨区双边交易 B5 与虚拟双边交易 T7 承担的网损为负数，造成 B2、B5、T7 这三笔交易分摊的网损为负数的原因为合同的交易路径与实际的潮流路径相反，在线路中引起了反向流。在一定的范围内，

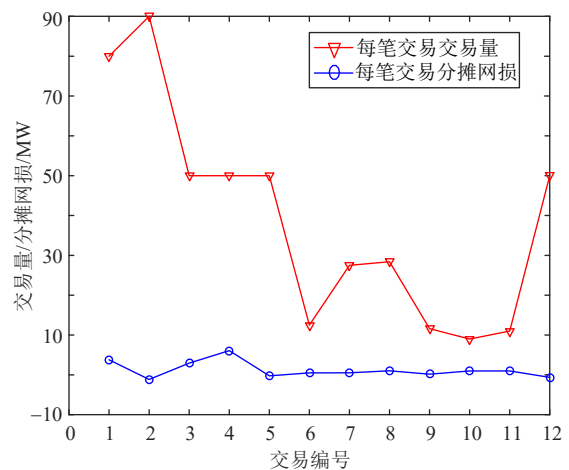


图 6 每笔交易的交易量与分摊网损的对比

Fig. 6 Comparison between the trading volume of each transaction and the apportionment of network loss

线路反向流越大，线路上的有功损耗越小，因此反向流的存在可以增大线路的运输能力与减小线路的有功损耗。

本文的算例中，交易 B2、B5、T7 由于反向流的存在，导致按照第一节的方法计算分摊的网损为负数。某笔交易分摊的网损为负数反映的是这笔交易的存在会使系统某条支路的损耗减小，这符合实际情况。同时，某笔交易的分摊网损为负数能给电力市场交易提供一定的正激励，在某些负荷需求增大时，优先增大分摊网损为负数的交易量，能够在满足系统稳态运行的同时，减少线路运输成本。

再对比图 6 的两曲线可得，交易分摊的网损量与交易量不是成正比的关系，例如：双边交易 B4 的合同交易量最小，分摊的网损量却是最大的，其主要原因是 B4 作为跨区双边交易受到多区域互联系统各节点间的电气距离与并行流等因素影响较多，但对于整个分摊结果的收支是平衡的。对于联营交易而言，是由 7 笔虚拟双边交易构成，因此联营交易总共承担的网损为 3.5451MW。将网损分给每笔交易后，原多区域互联系统已不存在耦合项，将其拆分为 5 个双边交易网络与 1 个联营交易网络分别进行碳流分布计算。5 笔双边交易网络的交易类型相同，因此合并为 1 个双边交易网络计算。

原系统被拆分为 1 个仅含双边交易的系统与 1 个仅含联营交易的系统。调用 MATPOWER6.0 直接对拆分后的联营交易网络计算网损，网络中所有支路的网损之和为 2.6127MW，这个数值小于原混合交易网络中联营交易网络的所承担的网损总量为 3.5451MW。两者相差 30% 的原因是当混合交易同时加到一个多区域互联系统时，会在不同的支路间产生网损耦合项，不先进行网损分摊直接拆分会导致“遗漏”部分的网损。为避免遗漏网损的情况出现，需先将网损进行双向分摊，再拆分成新的双边交易网络与联营交易网络。

对比图 7 中本文所提方法、不计及混合交易的潮流追踪法^[20]与传统碳流计算法^[9]3 种方法计算的支路碳流率可得：每条支路的碳流率均有一定的变化，支路 1 与支路 2 变化的最为明显，因为在混合交易网络中发电厂 1 仅签订双边交易协定，即仅参与双边交易；在联营交易中发电厂 1 仅作为平衡节点，参与联营交易的程度低。同时，从表 1 各机组出力与机组碳排放强度和图 5 虚拟双边交易数据可得，发电厂 2 作为火电机组，碳排放强度大，在向用户 5 供电时，在支路 1 与支路 2 产生了很大的反向碳流率，导致了支路 1、2 的碳流率与以往的碳

流率发生了明显的变化。这表明：追踪法计算的支路碳流率结果明显不符合混合交易对电力系统碳流分布的影响。根据原多区域互联系统的碳流分布，计算出各区域内负荷的碳流率，并与发电机产生的碳流率进行对比。

各负荷节点的碳流率分布见图 8。由图 8(a)可

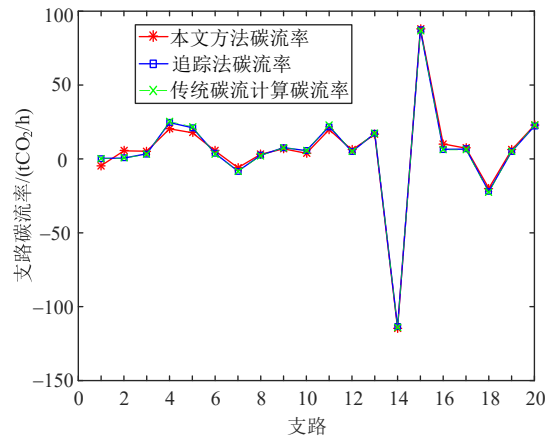
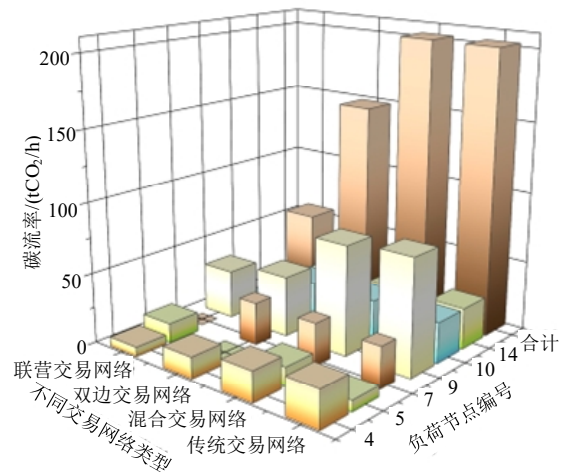
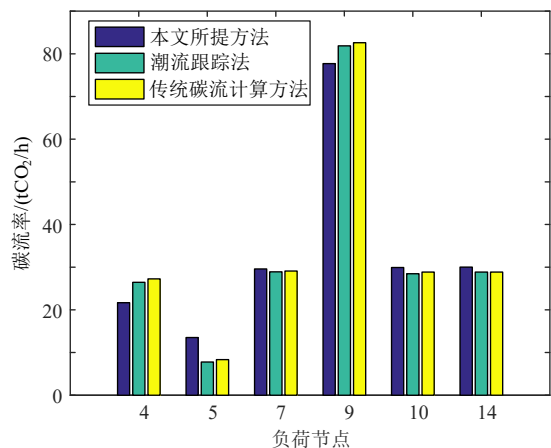


图 7 本文方法与传统计算支路碳流率对比
Fig. 7 Branch carbon flow rate of method in this paper and the traditional calculation method



(a) 不同交易网络下各负荷节点的碳流率分布



(b) 不同方法下原系统各负荷节点的碳流率分布

图 8 各负荷节点的碳流率分布
Fig. 8 Carbon flow rate distribution of each load node

知,本文所提方法计算得出的不同交易网络下的负荷节点总碳流率均与机组总注入碳流率相等,碳流率总体平衡得到满足。在双边交易网络中,用户4在网损分摊后,受入的电量为81.974MW,比用户7、10、14受入的电量大一些,但最终的负荷碳流率为15.103tCO₂/h。其主要原因是用户4仅与发电商1签订双边交易合同,发电商1作为水电机组,碳排放强度水平低,导致用户4的负荷碳流率较低。而其他用户均与火电发电商签订交易合同,负荷碳流率较高,符合混合交易中双边交易的交易特性。而联营交易中用户与发电商之间是通过电网交易的,各用户的碳流率也符合联营交易网络的碳流分布。在图8(b)中,传统碳流计算出的负荷碳流率均大于潮流跟踪法计算出的负荷碳流率。其主要原因是根据潮流跟踪法,火电厂分摊的网损较多,导致火力发电出力比例减少,致使系统的总发电量中,新能源发电的占比上升,导致总负荷碳流率有所下降。追踪法计算的负荷碳流率分布与本文方法计算的碳流率分布大致相同,但无法区分混合交易对系统碳流分布的影响。若混合交易中双边交易的比重增大,系统的碳流分布差异会更加明显。

根据联营交易网络与双边交易网络的碳流分布,再结合式(17)可以得出原始混合交易网络的节点碳势分布,并分别与联营交易网络中各节点碳势、双边交易网络中各节点碳势、两交易网络的各节点碳势代数和进行对比。可得:混合交易网络中各节点的碳势与其余两个交易网络的节点碳势并无明确的联系,并且普遍小于两个交易网络的节点碳势之和。证明原混合交易网络的节点碳势不能由联营交易网络的节点碳势与双边交易网络的节点碳势简单地叠加而来。节点8在原多区域互联系统的网络拓扑中,仅有一火电机组接入,并无其他支路向该节点输入有功功率与碳流率,因此该节点的碳势应等于此接入火电机组的碳排放强度,图9所示结果验证了这一结论,表明本文所述方法的正确性。

5 结论

本文提出了一种计及混合交易模式的多区域互联电力系统碳排放流计算方法,并基于此方法采用14节点系统进行验证,得到以下结论:

1) 将联营交易转换成虚拟双边交易,再运用网络分裂法将多区域中的各个子区域内部及其联络线进行等效转化,能够清晰体现交易在系统中的流向,并忽略了交易次序对系统的影响,使网损分摊给混合交易后更具公平性与合理性。

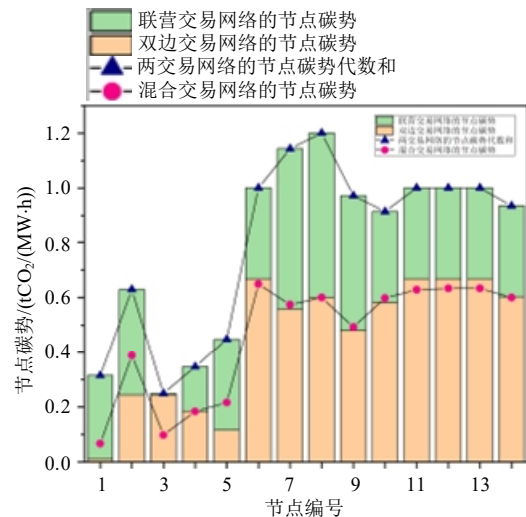


图9 混合交易网络的各节点碳势对比

Fig. 9 Comparison of carbon potential of each node in hybrid trading network

2) 将原系统拆分为仅包含双边交易的系统与仅包含联营交易的系统,分别进行碳流计算。一方面解决了不同交易间存在耦合项无法拆分的问题,在本文算例中,若不解决耦合项问题,联营网络计算时将会遗漏30%的网损,这对最终系统的碳流分布会产生一定影响。另一方面能够直观地展示出不同交易模式对系统碳流分布的影响,对后续的电力市场交易的发展具有一些指导性作用。

3) 混合交易网络、双边交易网络与联营交易网络3个网络的碳流总量保持平衡,与传统的碳流法计算出的碳流总量对比,误差仅为0.057%,并且计算出的碳流分布符合不同种交易的交易特性,能向电力用户展示碳排放的构成信息,助力引导负荷侧低碳响应。

参考文献

- [1] 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(in Chinese).
- [2] WU Zhaoyuan, ZHOU Ming, ZHANG Zhi, et al. An incentive profit-sharing mechanism for welfare transfer in balancing market integration[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 168: 112762.
- [3] WU Zhaoyuan, WANG Jianxiao, ZHONG Haiwang, et al. Sharing economy in local energy markets[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2023, 11(3): 714-726.
- [4] 田立亭, 程林, 郭剑波, 等. 虚拟电厂对分布式能源的管理和互动机制研究综述[J]. 电网技术, 2020, 44(6): 2097-2108.
TIAN Liting, CHENG Lin, GUO Jianbo, et al. A review on the study of management and interaction mechanism for distributed energy in virtual power plants[J]. Power System Technology, 2020, 44(6): 2097-2108(in Chinese).
- [5] 陈丽霞, 孙弢, 周云, 等. 电力系统发电侧和负荷侧共同碳责任分摊方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(19): 106-111.

- CHEN Lixia, SUN Tao, ZHOU Yun, et al. Method of carbon obligation allocation between generation side and demand side in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(19): 106-111(in Chinese).
- [6] WANG Caixia, LU Zongxiang, QIAO Ying. A consideration of the wind power benefits in day-ahead scheduling of wind-coal intensive power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(1): 236-245.
- [7] 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.
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): 2220-2235(in Chinese).
- [8] 周天睿, 康重庆, 徐乾耀, 等. 电力系统碳排放流分析理论初探[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(7): 38-43, 85.
ZHOU Tianrui, KANG Chongqing, XU Qian Yao, et al. Preliminary theoretical investigation on power system carbon emission flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7): 38-43, 85(in Chinese).
- [9] 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.
ZHOU Tianrui, KANG Chongqing, XU Qian Yao, et al. Preliminary investigation on a method for carbon emission flow calculation of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11): 44-49(in Chinese).
- [10] 周天睿, 康重庆, 徐乾耀, 等. 碳排放流在电力网络中分布的特性与机理分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(15): 39-44.
ZHOU Tianrui, KANG Chongqing, XU Qian Yao, et al. Analysis on distribution characteristics and mechanisms of carbon emission flow in electric power network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(15): 39-44(in Chinese).
- [11] 龚昱, 蒋传文, 李明炜, 等. 基于复功率潮流追踪的电力用户侧碳排放计量[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(17): 113-117.
GONG Yu, JIANG Chuanwen, LI Mingwei, et al. Carbon emission calculation on power consumer side based on complex power flow tracing[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(17): 113-117(in Chinese).
- [12] 康重庆, 程耀华, 孙彦龙, 等. 电力系统碳排放流的递推算法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(18): 10-16.
KANG Chongqing, CHENG Yaohua, SUN Yanlong, et al. Recursive calculation method of carbon emission flow in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(18): 10-16(in Chinese).
- [13] 毕瀚文, 范晓舟, 肖海, 等. 支撑电力系统全环节碳排放追踪的节点导纳矩阵算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(20): 7881-7891.
BI Hanwen, FAN Xiaozhou, XIAO Hai, et al. A node admittance matrix algorithm to support the carbon emission tracing model of whole power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(20): 7881-7891(in Chinese).
- [14] KANG Chongqing, ZHOU Tianrui, CHEN Qixin, et al. Carbon emission flow from generation to demand: a network-based model[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(5): 2386-2394.
- [15] LI Baowei, SONG Yonghua, HU Zechun. Carbon flow tracing method for assessment of demand side carbon emissions obligation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(4): 1100-1107.
- [16] 伍飞. 联营及双边交易混合模式下的输电网损分摊研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
- [17] 陈达, 鲜文军, 吴涛, 等. 混合电力市场下碳排放流的分配[J]. 电网技术, 2016, 40(6): 1683-1688.
CHEN Da, XIAN Wenjun, WU Tao, et al. Allocation of carbon emission flow in hybrid electricity market[J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1683-1688(in Chinese).
- [18] 李姚旺, 刘昱良, 杨晓斌, 等. 计及电量交易信息的用电碳计量方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(2): 439-450.
LI Yaowang, LI Yuliang, YANG Xiaobin, et al. Electricity carbon metering method considering electricity transaction information[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(2): 439-450(in Chinese).
- [19] 王婧婷, 王宇扬, 周明, 等. 考虑绿电交易的用户间接碳排放核算方法[J]. 电网技术, 2024, 48(1): 29-38.
WANG Jingting, WANG Yuyang, ZHOU Ming, et al. Accounting method of users' indirect carbon emissions considering green electricity trading[J]. Power System Technology, 2024, 48(1): 29-38(in Chinese).
- [20] 汪超群, 陈懿, 文福拴, 等. 电力系统碳排放流理论改进与完善[J]. 电网技术, 2022, 46(5): 1683-1691.
WANG Chaoqun, CHEN Yi, WEN Fushuan, et al. Improvement and perfection of carbon emission flow theory in power systems[J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1683-1691(in Chinese).
- [21] 严宇, 周明, 王霄, 等. 基于网络分裂法的跨区双边交易网损分摊方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(6): 1702-1710.
YAN Yu, ZHOU Ming, WANG Xiao, et al. Diakoptics based power losses allocation approach for cross-regional bilateral electricity transactions[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(6): 1702-1710(in Chinese).
- [22] 王霄. 互联网跨区双边交易网损分摊方法研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2016.
- [23] 刘洋, 崔雪, 谢雄, 等. 电碳联动环境下考虑社会效益最优的发电权交易研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(13): 112-117, 148.
LIU Yang, CUI Xue, XIE Xiong, et al. Research on the trading of clean energy power generation right with the best social benefit under the electric-carbon linkage environment[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(13): 112-117, 148(in Chinese).
- [24] 黄铭浩, 唐坤杰, 董树锋, 等. 基于碳流理论考虑用户侧碳排放配额的最优潮流[J]. 电网技术, 2023, 47(7): 2703-2712.
HUANG Minghao, TANG Kunjie, DONG Shufeng, et al. Optimal power flow considering user-side carbon emission allowances based on carbon flow theory[J]. Power System Technology, 2023, 47(7): 2703-2712(in Chinese).
- [25] 刘敏. 电力行业碳排放因素分解及减排机制研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2023.
- [26] 国家能源集团国华余姚发电公司. 9F级燃气轮机发电技术-燃机分册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2018.
- [27] 马学礼, 王笑飞, 孙希进, 等. 燃煤发电机组碳排放强度影响因素研究[J]. 热力发电, 2022, 51(1): 190-195.
MA Xueli, WANG Xiaofei, SUN Xijin, et al. Influence factors of carbon emission intensity of coal-fired power units[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(1): 190-195(in Chinese).



唐爱红

在线出版日期: 2024-04-18.

收稿日期: 2024-01-16.

作者简介:

唐爱红(1969), 女, 通信作者, 教授, 博士生导师, 主要从事智能电网运行与控制、柔性交直流输电技术的研究工作, E-mail: tah@whut.edu.cn;

余文晗(1999), 男, 硕士研究生, 主要从事低电压运行、电力交易的研究工作, E-mail: ywh13997803456@163.com;

张莹(1980), 女, 硕士, 主要从事电力系统的工作, E-mail: 1578954014@qq.com;

瞿子涵(1988), 男, 博士, 主要从事电力系统的工作, E-mail: 1009106487@qq.com;

王庆铭(1990), 男, 博士研究生, 主要从事智能电网运行与控制、低碳电力运行的研究工作, E-mail: wangqm1990@126.com;

王文浩(2000), 男, 硕士研究生, 主要从事智能电网运行与控制的研究工作, E-mail: 862963370@qq.com.

(责任编辑 徐梅)