

# 计及电量交易信息的用电碳计量方法

李姚旺<sup>1</sup>, 刘昱良<sup>2</sup>, 杨晓斌<sup>3</sup>, 何伟<sup>3</sup>, 方宇娟<sup>1</sup>, 杜尔顺<sup>1</sup>, 张宁<sup>1\*</sup>, 李佳<sup>3</sup>

(1. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学电机系), 北京市 海淀区 100084; 2. 清华四川能源互联网研究院, 四川省 成都市 610213; 3. 国网江西省电力有限公司, 江西省 南昌市 330096)

## Electricity Carbon Metering Method Considering Electricity Transaction Information

LI Yaowang<sup>1</sup>, LIU Yuliang<sup>2</sup>, YANG Xiaobin<sup>3</sup>, HE Wei<sup>3</sup>, FANG Yujuan<sup>1</sup>, DU Ershun<sup>1</sup>, ZHANG Ning<sup>1\*</sup>, LI Jia<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Power System and Generation Equipment (Department of Electrical Engineering, Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China; 2. Sichuan Energy Internet Research Institute, Tsinghua University, Chengdu 610213, Sichuan Province, China; 3. State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd., Nanchang 330096, Jiangxi Province, China)

**ABSTRACT:** Exploiting the electricity-carbon coupling value and establishing an electricity-carbon synergistic market are important means for achieving carbon peak and carbon neutrality targets. The coupling of electricity carbon information relies on a reasonable and effective electricity carbon measurement system. However, the current electricity carbon measurement system still needs to be improved. It is difficult to fully clarify the carbon emission responsibilities within electricity trading behavior. Facing the above challenge, this paper proposes a new electricity carbon metering method considering the electricity trading behavior and based on the theory of carbon emission flow. First, the actual lossy network is equivalent to a lossless network considering the calculation characteristics of the carbon emission flow theory. After that, the transaction electricity and non-transaction electricity flow are disassembled, and their carbon emission responsibility is independently measured according to their electricity sources. This method strictly abides by the principle of direct and indirect carbon emissions balancing, and it can clarify the transfer of carbon emissions responsibility behind electricity trading behavior. Also, the spatial and temporal differences in carbon emission factors can be reflected by this method, and it has the ability of leading low-carbon demand response. Based on operation profiles from the PJM-5 bus system and the power system of a city in China, the simulation analysis is carried out. The simulation results verify the effectiveness of the method.

**KEY WORDS:** new-type power system; carbon metering; electricity market; carbon market; carbon emission flow theory

**摘要:** 充分挖掘电碳耦合价值, 构建电碳协同市场是实现碳

达峰、碳中和目标的重要抓手。电碳信息的耦合依赖一套合理、有效的用电碳计量体系, 但我国现行用电碳计量体系中尚未考虑电量交易信息的影响, 不能完全厘清每个电量交易行为背后蕴含的碳排放责任。针对此问题, 该文从碳排放流理论出发, 提出一套计及电量交易行为的用电碳计量新方法。首先, 根据碳排放流理论的计算特性, 针对有损网络建立其无损等效网络模型; 之后, 将交易电量和非交易电量拆解开来, 并分别根据其电量来源独立核算其产生的对应碳排放责任。该文方法严格遵守直接和间接碳排放的总量守恒原则, 能够厘清电量交易行为背后蕴含的碳排放责任转移, 且能够兼顾碳排放因子的时空差异性量化需求, 进而具备引导用户开展低碳需求响应的能力。基于 PJM-5 节点系统和我国某地市实际数据开展仿真分析, 仿真结果验证该文方法的有效性。

**关键词:** 新型电力系统; 碳计量; 电力市场; 碳市场; 碳排放流理论

## 0 引言

电力行业是我国最大的碳排放行业, 电力行业低碳转型被认为是我国低碳发展的关键<sup>[1]</sup>。在电力系统低碳转型全方位解决方案中, 市场手段因其在优化资源配置、促进成本疏导和推动自主减碳等方面的优异表现, 被认为是电力低碳转型解决方案的关键环节之一<sup>[2]</sup>。目前, 能源生产成本中的环境价值已越来越受到社会各界的广泛关注。2021年9月7日, 我国绿色电力交易试点正式启动后的首次交易完成, 来自北京、江苏、辽宁等17个省份的259家市场主体达成了79.35亿kW·h的绿电交易, 预计可减排二氧化碳607.18万t<sup>[3]</sup>。2021年7月16日, 全国碳市场正式启动, 首批纳入全国碳市场的

**基金项目:** 国家电网公司总部科技项目“新型电力系统下电力碳排放核算方法及关键技术研究”(52182021N006)。

Project Supported by Scientific & Technical Project of State Grid “Research on electricity carbon emission accounting methods and key technologies under new power systems”(52182021N006)。

主要为电力企业<sup>[4]</sup>。

实际上,绿电电力市场与碳市场关系紧密:在政策作用机理方面,两者相辅相成;在市场主体方面,两者高度重合;在价格联动方面,两者相互作用。但是,目前两者尚处于割裂的双轨运行状态,带来了对环境权益重复激励和双重考核的不利后果。因此,工业界和学术界正在努力寻找构建“电碳”统一市场的解决方案<sup>[5]</sup>。

实现“电碳”统一市场的构建,一套合理、有效的用电碳计量体系至关重要,该体系是反映电力交易行为背后蕴含碳排放责任的关键判据,是链接电-碳信息的桥梁。目前,国内用电碳计量方面主要采用平均碳排放因子法,该因子主要基于省级电网的全年燃料数据,采用平均化处理的方式得到。平均碳排放因子法能够作为衡量用户度电含碳量的有效参考,但该方法存在以下不足之处:

1) 未考虑到市场环境下,电量交易行为中蕴含的碳排放责任转移。在“双碳”目标背景下,电能中蕴含的碳排放责任逐渐受到用户的重视,部分用户甚至在购置电能时,反而更加关注其购买电能中所蕴含的碳排放责任,如:绿电交易等,而平均碳排放因子法因采用区域平均化处理的方式计算度电含碳量,无法对电能交易流中蕴含的碳排放责任进行合理分摊。

2) 容易造成低碳效益或碳排放责任的重复计算。购买绿电是目前用户常用的降低其电力碳排放的方式,用户通过绿电替代实现用电碳排放量的核减,但是,由于目前的碳计量体系中缺乏对绿电成分的有效辨析,而是采用平均碳排放因子的方式对全电量碳排放进行平均化处理,因此,在基于平均碳排放因子的碳计量中实际上就已经考虑了绿电的零碳排放效益,从而造成了绿电低碳效益的重复计算;同理,对于购买煤电的电力用户而言,其所购置电量的碳排放责任同样存在重复计算的问题。

3) 无法反映碳排放因子的时空差异性。文献[6]详细分析了平均碳排放因子法在碳排放因子时空差异性量化方面的不足,由于该方法无法将足够精细的碳排放因子信息传递给用户,因而无法引导用户侧开展低碳需求响应。

目前,已有部分学者针对当前用电碳计量方法不足开展了深化研究。文献[7]沿用碳排放因子的思路,开展计及区域间电量交易的用电碳排放计量方法研究,并基于北欧数据分析了区域间电量交易对

各区域电网碳排放因子的影响。但是,该方法仍基于平均碳排放因子开展,无法引导用户进行低碳需求响应。文献[8]提出基于合作博弈的用电碳计量方法,该方法具有较好的公平性、激励性和稳定性,但其只考虑了对碳排放的分摊,并未考虑电-碳信息的耦合,且面对用户数量众多的工程化应用场景,其计算复杂度显著提升。文献[9]引入节点边际碳强度的概念,基于边际分析法分析系统负荷变化引起的碳排放变化情况,并基于此量化用户的用电碳排放量,该方法可实现增量负荷的碳排放量实时计量,但难以量化用户一段时间用电总碳排放,同时也忽略了交易行为的影响。文献[10]提出一种混合电力市场下碳排放责任的分配方法,其将负荷电量来源分为双边交易电量和联营交易电量,双边交易电量直接根据交易电源类型确定碳排放责任,联营交易电量根据潮流的比例共享原则确定碳排放责任。该文基于潮流追踪思想,对市场环境下的碳排放责任进行了分配,但并未对双边交易潮流和联营交易潮流进行区分,而且其直接根据实际物理潮流设定了联营交易电量的碳排放责任分配比例,从而带来了一定的计量不公平性;此外,该方法并未提供市场环境下非交易电量的动态碳排放因子计量方法,未能实现对低碳需求响应的有效兼容。文献[11]提出一种基于潮流溯源的用户侧绿色电力证书分配方法。该方法重点关注绿证的分配问题,而非碳排放责任的分摊问题,其主要采用基于潮流追踪的碳排放溯源数据,将绿色电力证书在系统用户间进行分配。

近年来,碳排放流理论<sup>[12]</sup>已在用电碳计量领域受到了广泛关注,该理论具有较为完备的理论体系<sup>[13-16]</sup>,能够兼顾用电碳计量中的公平性原则,计算简单、适合工程化应用,已逐渐从理论走向实践。目前,基于该理论提出的碳计量方法已在江苏常州和江苏南京开展了示范应用<sup>[17-18]</sup>,并取得了良好的示范应用效果。

为此,本文以碳排放流理论为技术核心,考虑兼顾文献[6]中提出的低碳需求响应的应用要求,提出能够区分电能交易流与非交易流中碳排放责任的用电碳计量方法,并从厘清交易流中电能来源成分的角度出发,避免清洁电能低碳效益和常规电源碳排放责任的重复计算,以解决当前电力碳计量体系中存在的主要问题。本文所提出的方法旨在进一步明晰电力碳排放,促进电-碳耦合,助力双碳目标

实现。

### 1 市场环境下电力系统碳计量方法架构

在用户用电碳排放责任分摊问题中，电力潮流是开展碳排放责任分摊的重要依据，电力潮流中包含了丰富的信息：不但能够从中提取到交易流信息，还能够从中提取到电量的碳排放来源信息，其是开展市场环境下电力系统碳排放计量的重要数据基础。因此，本文基于电力潮流数据，以碳排放流理论为核心，提出考虑交易信息的电力系统碳计量方法。该方法中的用户用电碳排放责任分摊示意图如图 1 所示。

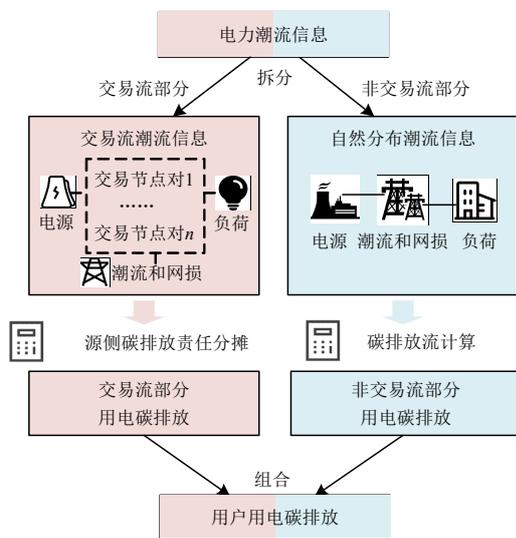


图 1 用户用电碳排放责任分摊示意图

Fig. 1 Diagram of sharing demand side carbon emission responsibility

在电力市场环境下，用户的电量来源于 2 个途径：1) 在电力市场中通过签订合同，来自于已签订合同电源的电量；2) 非市场环境下，不同电源经由输配电网传输给用户的电量。两部分电量所蕴含的碳排放责任有所不同：1) 合约电量的碳排放来源单一，其所产生的间接碳排放完全来自于所签订合同电源的直接碳排放；2) 非交易电量部分的碳排放来源较为复杂，其所承担的碳排放责任受系统中所有未参与电量合约的电源影响，该部分碳排放责任可基于碳排放流理论进行分摊，但为了保证碳排放责任分摊的合理性，用于碳排放流计算的潮流应该扣除交易行为对实际潮流产生的影响，扣除交易影响部分的潮流为自然状态下的潮流分布，本文称为自然分布潮流。

本文的碳计量思路为：通过将电力潮流信息进行拆分，拆分为交易流下的潮流信息和自然分布状

态下的潮流信息，再分别根据合约电源碳排放责任分摊和碳排放流分析理论对两部分碳排放责任进行计算，得到交易流部分的用电碳排放信息和非交易流部分的用电碳排放信息，最后通过组合方式得到用户在电力市场环境下的总碳排放水平。

市场环境下的电力系统碳计量需要遵循以下原则：

1) 独立核算原则。交易流中蕴含的用电间接碳排放量和非交易流中蕴含的用电间接碳排放量需要被分别单独核算；而且在计算两者碳排放责任时都应该完全扣除对方的影响，从而避免低碳效益和碳排放责任的重复计量。

2) 总量守恒原则。每个交易流中分摊得到的网损间接碳排放量和用电间接碳排放量实时等于提供该合约电量电源的直接碳排放量；自然分布潮流下分摊得到的系统总网损间接碳排放量和系统总用电间接碳排放量实时等于系统中未参与交易电源的总直接碳排放量。

### 2 市场环境下电力系统碳计量核算中的基本概念与定义

为提出市场环境下的电力系统碳计量核算方法，需要定义面向电力碳计量核算的基本物理量。

#### 1) 交易节点对。

交易节点对表示有电量合约关系的电源节点和用户节点，系统中的交易节点对集合由  $Y$  表示。

#### 2) 实际机组注入分布矩阵。

实际机组注入分布矩阵主要用于描述系统中所有电源与电力系统的连接关系以及机组向系统中注入的实际有功功率情况。若系统中总节点数为  $N$ ，发电机数量为  $K$ ，则实际机组注入分布矩阵为  $K \times N$  阶矩阵，用  $P_{G,t} = (P_{Gkj,t})_{K \times N}$  表示。矩阵中的元素具体定义如下：

若第  $k(k=1, 2, \dots, K)$  台发电机组接入节点  $j$ ，且第  $t$  时段从该机组注入节点  $j$  的有功潮流为  $p$ ，则  $P_{Gkj,t} = p$ ，否则  $P_{Gkj,t} = 0$ 。

#### 3) 交易机组注入分布矩阵。

交易机组注入分布矩阵主要用于描述系统中签订电量合约机组与电力系统的链接关系及其交易情况。针对每一个电量合约  $y$ ，交易机组注入分布矩阵均为  $K \times N$  阶矩阵，用  $P_{G,t}^{TD,y} = (P_{Gkj,t}^{TD,y})_{K \times N}$  表示。矩阵中的元素具体定义如下：

若第  $k(k=1, 2, \dots, K)$  台发电机组接入节点  $j$ ，且

第  $t$  时段根据合约  $y$  该机组需要提供的有功潮流为  $p$ , 则  $P_{Gkj,t}=p$ , 否则  $P_{Gkj,t}=0$ 。

#### 4) 非交易机组注入分布矩阵。

非交易机组注入分布矩阵主要用于描述系统中未签订交易合约机组的出力情况。非交易机组注入是影响系统潮流自然分布的关键因素。非交易机组注入分布矩阵为  $K \times N$  阶矩阵, 用  $\mathbf{P}_{G,t}^{\text{NA}} = (\mathbf{P}_{Gkj,t}^{\text{NA}})_{K \times N}$  表示。其可由实际机组注入分布矩阵和交易机组注入分布矩阵计算得到:

$$\mathbf{P}_{G,t}^{\text{NA}} = \mathbf{P}_{G,t} - \sum_{y \in \mathcal{Y}} \mathbf{P}_{G,t}^{\text{TD},y} \quad (1)$$

#### 5) 实际支路潮流分布矩阵。

实际支路潮流分布矩阵主要用于描述电力系统的实际有功潮流分布情况, 该矩阵同时包含电力网络的拓扑信息和有功潮流信息。实际支路潮流分布矩阵为  $N$  阶方阵, 用  $\mathbf{P}_{B,t} = (\mathbf{P}_{Bij,t})_{N \times N}$  表示。矩阵中的元素具体定义如下:

若节点  $i$  与节点  $j(i, j=1, 2, \dots, N)$  间有支路相连, 且第  $t$  时段经此支路流入节点  $j$  的正向有功潮流为  $p$ , 则  $P_{Bij,t}=p$ ,  $P_{Bji,t}=0$ ; 若流经该支路的有功潮流  $p$  为反向潮流, 则  $P_{Bij,t}=0$ ,  $P_{Bji,t}=p$ ; 其他情况下  $P_{Bij,t}=P_{Bji,t}=0$ 。特别地, 对所有对角元素, 有  $P_{Bii,t}=0$ 。

#### 6) 交易流支路潮流分布矩阵。

交易流支路潮流分布矩阵主要用于描述由电量合同引起的支路潮流分布情况。针对每一个电量合约  $y$ , 由该交易节点对引起的交易流支路潮流分布矩阵为一个  $N$  阶的方阵, 用  $\mathbf{P}_{B,t}^{\text{TD},y} = (\mathbf{P}_{Bij,t}^{\text{TD},y})_{N \times N}$  表示。与实际支路潮流分布矩阵类似, 矩阵中的元素具体定义如下:

若节点  $i$  与节点  $j(i, j=1, 2, \dots, N)$  间有支路相连, 且第  $t$  时段受交易节点对  $y$  的电量合约影响, 经此支路流入节点  $j$  的正向有功潮流为  $p$ , 则  $P_{Bij,t}^{\text{TD},y} = p$ ,  $P_{Bji,t}^{\text{TD},y} = 0$ ; 若流经该支路的有功潮流  $p$  为反向潮流, 则  $P_{Bij,t}^{\text{TD},y} = 0$ ,  $P_{Bji,t}^{\text{TD},y} = p$ ; 其他情况下  $P_{Bij,t}^{\text{TD},y} = P_{Bji,t}^{\text{TD},y} = 0$ 。特别地, 对所有对角元素, 有  $P_{Bii,t}^{\text{TD},y} = 0$ 。

#### 7) 自然分布支路潮流分布矩阵。

自然分布支路潮流分布矩阵主要用于描述由非交易电量引起的支路潮流分布情况。自然分布支路潮流分布矩阵为  $N$  阶方阵, 用  $\mathbf{P}_{B,t}^{\text{NA}} = (\mathbf{P}_{Bij,t}^{\text{NA}})_{N \times N}$  表示。其可由实际支路潮流分布矩阵和交易流支路潮流分布矩阵计算得到:

$$\mathbf{P}_{B,t}^{\text{NA}} = \mathbf{P}_{B,t} - \sum_{y \in \mathcal{Y}} \mathbf{P}_{B,t}^{\text{TD},y} \quad (2)$$

#### 8) 实际负荷分布矩阵。

实际负荷分布矩阵主要用于描述系统中各个节点的负荷分布情况。若系统中总负荷数为  $M$ , 则实际负荷分布矩阵为  $M \times N$  阶矩阵, 用  $\mathbf{P}_{L,t} = (\mathbf{P}_{Lmj,t})_{M \times N}$  表示。矩阵中的元素具体定义如下: 若节点  $j$  是第  $m(m=1, 2, \dots, M)$  个存在负荷的节点, 且有功负荷为  $p$ , 则  $P_{Lmj,t}=p$ , 否则  $P_{Lmj,t}=0$ 。

#### 9) 交易负荷分布矩阵。

交易负荷分布矩阵主要用于描述系统中签订电量合约负荷的分布情况。针对每一个电量合约  $y$ , 交易负荷分布矩阵均为  $M \times N$  阶矩阵, 用  $\mathbf{P}_{L,t}^{\text{TD},y} = (\mathbf{P}_{Lmj,t}^{\text{TD},y})_{M \times N}$  表示。矩阵中的元素具体定义如下:

若节点  $j$  是第  $m(m=1, 2, \dots, M)$  个存在电量交易负荷的节点, 且有功负荷为  $p$ , 则  $P_{Lmj,t}^{\text{TD},y} = p$ , 否则  $P_{Lmj,t}^{\text{TD},y} = 0$ 。

#### 10) 非交易负荷分布矩阵。

非交易负荷分布矩阵主要用于描述系统中未在电力市场中签订交易合约的用户的负荷分布情况。非交易负荷分布矩阵为  $M \times N$  阶矩阵, 用  $\mathbf{P}_{L,t}^{\text{NA}} = (\mathbf{P}_{Lmj,t}^{\text{NA}})_{M \times N}$  表示。其可由实际负荷分布矩阵和交易负荷分布矩阵计算得到:

$$\mathbf{P}_{L,t}^{\text{NA}} = \mathbf{P}_{L,t} - \sum_{y \in \mathcal{Y}} \mathbf{P}_{L,t}^{\text{TD},y} \quad (3)$$

#### 11) 实际网损分布矩阵。

实际网损分布矩阵主要用于描述电力系统的有功网损分布。实际网损分布矩阵为  $N$  阶方阵, 用  $\mathbf{P}_{BL,t} = (\mathbf{P}_{BLij,t})_{N \times N}$  表示。矩阵中的元素具体定义如下:

若节点  $i$  与节点  $j(i, j=1, 2, \dots, N)$  间有支路相连, 且经此支路流入节点  $j$  的正向有功潮流不为零且该支路上有功损耗为  $\Delta p$ , 则  $P_{BLij,t}=\Delta p$ ,  $P_{BLji,t}=0$ ; 若流经该支路的有功潮流为反向潮流, 则  $P_{BLij,t}=0$ ,  $P_{BLji,t}=\Delta p$ ; 其他情况下  $P_{BLij,t}=P_{BLji,t}=0$ 。特别地, 对所有对角元素,  $P_{BLi,t}=(i=1, 2, \dots, N)$  表示节点  $i$  处的总有功损耗。若研究对象为无损网络,  $P_{BL,t}$  为零矩阵。

#### 12) 交易流网损分布矩阵。

交易流网损分布矩阵主要用于描述由交易行为引起的支路网损分布情况。针对每一个电量合约  $y$ , 交易流网损分布矩阵均为  $N$  阶方阵, 用  $\mathbf{P}_{BL,t}^{\text{TD},y} = (\mathbf{P}_{BLij,t}^{\text{TD},y})_{N \times N}$  表示。矩阵中的元素具体定义如下:

若节点  $i$  与节点  $j(i, j=1, 2, \dots, N)$  间有支路相连, 且交易流  $y$  场景下经此支路流入节点  $j$  的正向有功

潮流不为零且该支路上有功损耗为  $\Delta p$ ，则  $P_{BLij,t}^{TD,y} = \Delta p$ ， $P_{BLij,t}^{TD,y} = 0$ ；若流经该支路的有功潮流为反向潮流，则  $P_{BLij,t}^{TD,y} = 0$ ， $P_{BLij,t}^{TD,y} = \Delta p$ ；其他情况下  $P_{BLij,t}^{TD,y} = P_{BLij,t}^{TD,y} = 0$ 。特别地，对所有对角元素， $P_{BLii,t}^{TD,y}$  ( $i=1, 2, \dots, N$ )表示节点  $i$  处由交易流  $y$  引起的总有功损耗。若研究对象为无损网络， $P_{BL,t}$  为零矩阵。

13) 自然分布网损分布矩阵。

自然分布网损分布矩阵主要用于描述由自然分布潮流引起的网损分布情况。自然分布网损分布矩阵为  $N$  阶方阵，用  $P_{BL,t}^{NA} = (P_{BLij,t}^{NA})_{N \times N}$  表示。其可由实际网损分布矩阵和交易流网损分布矩阵计算得到：

$$P_{BL,t}^{NA} = P_{BL,t} - \sum_{y \in Y} P_{BL,t}^{TD,y} \quad (4)$$

### 3 面向碳流计算的基础与合约电量拆解

如何将交易流产生的潮流信息合理、有效的拆解出来，是厘清市场环境下用户用电碳排放责任的关键。本文首先将由实际潮流信息构建的有损网络转换为等效无损网络，再根据无损网络的线性可叠加特性，将合约电量引起的潮流信息从无损网络中拆解出来。

#### 3.1 面向碳流计算的无损网络等效方法

碳排放流指标的计算具有邻接特性。该特性的含义为：电网中某一节点的碳排放因子只与其注入节点的碳排放因子及支路的有功功率有关，而与节点流出有功功率无关，即节点负荷大小不会影响该节点的碳排放因子。

此外，公平性原则是碳排放流计算的核心原则之一。该原则主要含义为：从节点流出潮流的支路碳流密度均相等，且等于该节点的碳排放因子。根据公平性原则，计算同一节点流出潮流所在支路的网损碳排放量和该节点负荷用电碳排放量时，所采用的支路碳流密度与节点碳排放因子实时相等。支路网损碳排放量和负荷用电碳排放量均可以根据所在节点的碳排放因子乘以对应支路网损量或负荷量计算得到。

由以上两个特性可知，在电力系统碳排放流计算过程中，沿着支路潮流的流动方向，将网损等效为支路潮流源节点上的负荷，既不会影响节点碳排放因子的计算结果，也不会影响网损碳排放量的计算结果。基于该等效手段，能够将原始有损网络等效为无损网络，等效示意图如图 2 所示。

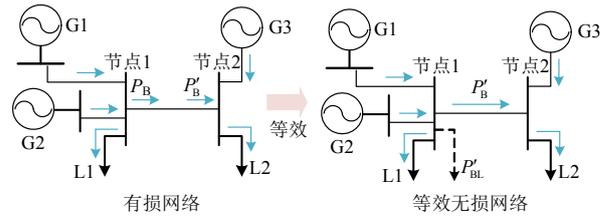


图 2 面向碳流计算的无损网络等效方法

Fig. 2 Equivalent method to obtain lossless network for carbon emission flow calculation

图 2 中， $P'_B$  表示无损网络中除去网损后的线路传输潮流，无损网络中的实际支路潮流分布矩阵  $P'_{B,t}$ 、交易流支路潮流分布矩阵  $P_{B,t}^{TD,y}$  和自然分布支路潮流分布矩阵  $P_{B,t}^{NA}$  分别对应原始有损网络中的  $P_{B,t}$ 、 $P_{B,t}^{TD,y}$  和  $P_{B,t}^{NA}$ ； $P'_{BL}$  表示无损网络中连接在节点上的等效网损负荷。在等效无损网络中，网损分布矩阵  $P'_{BL,t}$  为对角矩阵，矩阵中对角元素为连接在该节点上潮流流出支路的网损等效负荷之和：

$$P'_{BLii,t} = \sum_{i \in \Omega_i} P_{BLij,t}, \quad \Omega_i \text{ 为节点 } i \text{ 流出潮流支路集合,}$$

矩阵  $P'_{BL,t}$  的非对角元素为 0； $P_{BL,t}^{TD,y}$  和  $P_{BL,t}^{NA}$  分别为对应的等效无损网络中交易流网损分布矩阵和自然分布网损分布矩阵。

拆解后的等效无损网络系统可以近似看作线性系统，满足线性叠加定理，即多个交易节点对给系统潮流分布带来的影响均可以根据系统潮流灵敏度分析矩阵进行量化，并根据叠加定理得到系统自然潮流分布结果。

#### 3.2 交易合约影响下的潮流信息拆解方法

在交易合约影响下，需要拆解出的潮流信息主要包括：交易机组发电信息、交易流支路潮流信息、交易流网损信息以及交易负荷信息。以上信息的拆解步骤如下：

步骤 1：得到交易负荷分布矩阵。

根据电量合约  $y$  在  $t$  时段的负荷电量交易信息，以及负荷自身所属节点位置，得到交易负荷分布矩阵  $P_{L,t}^{TD,y}$ 。

步骤 2：得到支路潮流分布矩阵。

根据交易负荷信息，厘清该交易节点对引起的潮流传输功率分布情况。功率传输分布因子(power transfer distribution factor, PTDF)定义了节点之间传输功率变化时引起的支路潮流变化量情况，其常用于量化电力市场中，发电机节点和负荷节点间购售电合同变化时引起的系统功率分布变化情况，其具体计算方法详见文献[19]。

本文采用PTDF矩阵量化每个交易节点对带来的潮流分布信息。交易节点对 $y$ 引起的支路潮流变化情况如式(5)所示:

$$\hat{P}_{B,t}^{\text{TD},y} = F_{\text{PTDF}} \hat{P}_{N,t}^{\text{TD},y} \quad (5)$$

式中:  $\hat{P}_{B,t}^{\text{TD},y}$  为交易流支路潮流列向量, 矩阵元素  $\hat{P}_{B,l,t}^{\text{TD},y}$  为电量合约 $y$ 下第 $l$ 条支路在 $t$ 时段的传输潮流;  $\hat{P}_{N,t}^{\text{TD},y}$  为节点注入功率列向量, 矩阵元素  $\hat{P}_{N,n,t}^{\text{TD},y}$  表示 $t$ 时段节点对 $y$ 在节点 $n$ 的注入潮流, 假设交易节点对 $y$ 在 $t$ 时段的合约电量为 $p$ , 则发电机组所在节点元素  $\hat{P}_{N,n,t}^{\text{TD},y} = p$ , 负荷所在节点元素  $\hat{P}_{N,n,t}^{\text{TD},y} = -p$ , 其余元素均为0。

基于计算得到的交易流支路潮流列向量计算结果, 结合交易流支路潮流分布矩阵中元素的计算规则, 即可得到等效无损网络的交易流支路潮流分布矩阵:

$$P'_{B,t}{}^{\text{TD},y} = g(\hat{P}_{B,t}^{\text{TD},y}) \quad (6)$$

式中  $g(\cdot)$  为将交易流支路潮流列向量转换为交易流支路潮流分布矩阵的转换函数。

步骤3: 得到交易流网损分布矩阵。

网损碳排放同样为系统中重要的间接碳排放信息, 目前, 对于网损碳排放责任的承担主体尚无定理, 但是, 不论网损碳排放责任由源侧、网侧还是荷侧承担, 该部分责任的交易流来源及数值大小是应该被厘清的重要信息。

因此, 根据独立核算原则, 本文在拆分交易行为的潮流信息时, 考虑将每个交易流所产生的网损信息也对应拆分出来, 并对其网损碳排放责任进行核算; 此外, 不同交易流以及自然分布潮流下得到的网损总量同样满足总量守恒原则。

除以上两项原则外, 进行网损信息拆分时, 主要基于以下两项原则进行网损信息拆分:

1) 贡献分摊原则: 与真实潮流方向相反的潮流, 不会对真实网损产生贡献量, 因此不考虑产生网损分摊。

2) 比例分摊原则: 对于产生贡献的自然分布潮流, 按照自然分布下线路传输功率占实际潮流的比例进行网损责任分摊; 对于产生贡献的节点对, 按照交易节点对所产生的线路传输功率的比例进行剩余网损责任分摊。

交易流下网损信息拆分流程图如图3所示。

首先, 根据自然潮流分布信息, 计算得到自然潮流分布所产生的网损, 以实际线路传输潮流为正

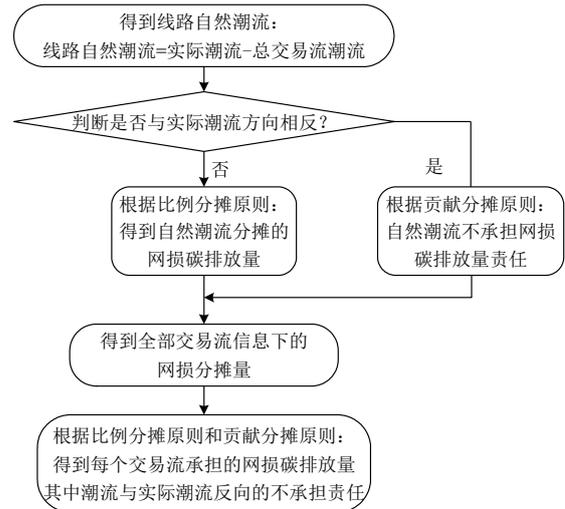


图3 交易流下网损信息拆分流程图

Fig. 3 Schematic diagram of the disassembled power flow losses under electric market

方向, 根据贡献分摊原则和比例分摊原则, 自然潮流分布产生的网损信息可由式(7)计算得到:

$$P_{BLij,t}^{\text{NA}} = \frac{\max(P'_{Bij,t}{}^{\text{NA}}, 0)}{P'_{Bij,t}} \times P_{BLij,t} \quad (7)$$

式中  $\max(a,b)$  表示取 $a$ 、 $b$ 中较大数值的函数。

之后, 由全部交易节点对分摊剩余的网损信息, 根据贡献分摊原则和比例分摊原则, 电量合约 $y$ 下的交易流网损信息可由式(8)计算得到:

$$P_{BLij,t}^{\text{TD},y} = \frac{\max(P'_{Bij,t}{}^{\text{TD},y}, 0)}{\sum_{y \in Y} \max(P'_{Bij,t}{}^{\text{TD},y}, 0)} \times (P_{BLij,t} - P_{BLij,t}^{\text{NA}}) \quad (8)$$

最后, 根据  $P_{BLij,t}^{\text{TD},y}$  即可得到原始有损网络中的交易流网损分布矩阵  $P_{BL,t}^{\text{TD},y}$ , 进而得到等效无损网络中交易流网损分布矩阵  $P_{BL,t}^{\text{TD},y}$ 。

步骤4: 交易机组注入分布矩阵。

根据交易负荷分布矩阵  $P_{L,t}^{\text{TD},y}$  和交易流网损分布矩阵  $P_{BL,t}^{\text{TD},y}$ , 结合无损网络特性, 得到可得到交易机组注入分布矩阵的元素信息, 假设机组 $k$ (接入节点 $i$ )和负荷 $m$ (接入节点 $j$ )组成交易节点对, 元素  $P_{Gki,t}^{\text{TD},y}$  可由式(9)计算得到, 根据元素信息易得交易机组注入分布矩阵  $P_{G,t}^{\text{TD},y}$ 。

$$P_{Gki,t}^{\text{TD},y} = P_{Lmj,t}^{\text{TD},y} + \sum_{i \in N, j \in N} P_{BLij,t}^{\text{TD},y} \quad (9)$$

#### 4 计及电量交易信息的碳计量方法

交易流中蕴含的碳信息和非交易流中蕴含的碳信息将分别独立核算。

针对交易流中蕴含的碳信息, 对于任一交易节

点对  $y$ ，其用电和网损碳排放全部来源于对应的交易机组。因此，电量合约  $y$  下(机组  $k$  与负荷  $m$  间进行电量交易)，节点碳排放因子为

$$\varepsilon_{Gk,t}^{TD,y} = \varepsilon_{Ni,t}^{TD,y} \quad (10)$$

式中： $\varepsilon_{Gkj}^{TD,y}$  表示电量合约  $y$  下机组  $k$  的发电碳排放因子； $\varepsilon_{Ni,t}^{TD,y}$  表示电量合约  $y$  下节点  $i$  的用电碳排放因子。

根据节点碳排放因子，电量合约  $y$  下的用户用电间接碳排放量和网损碳排放量可分别由式(11)、(12)计算得到：

$$E_{Lm}^{TD,y} = \sum_{t \in T} P_{Lmj,t}^{TD,y} \varepsilon_{Nj,t}^{TD,y} \quad (11)$$

$$E_{BLi}^{TD,y} = \sum_{t \in T} P'_{BLi,t}^{TD,y} \varepsilon_{Ni,t}^{TD,y} \quad (12)$$

式中： $T$  表示碳核算统计时长； $E_{Lm}^{TD,y}$  和  $E_{BLi}^{TD,y}$  分别表示电量合约  $y$  下负荷  $m$  的用电间接碳排放量和接在节点  $i$  上等效网损负荷的间接碳排放量。

针对非交易流中蕴含的碳信息，可根据非交易机组出力矩阵  $\mathbf{P}_{G,t}^{NA}$ 、自然分布支路潮流分布矩阵  $\mathbf{P}'_{B,t}^{NA}$ 、非交易负荷分布矩阵  $\mathbf{P}_{L,t}^{NA}$  和自然分布网损分布矩阵  $\mathbf{P}_{BL,t}^{NA}$ ，结合电力系统碳排放流理论计算得到。首先，计算得到负荷所属节点的节点碳排放因子，计算表达式如式(13)所示，文献[13]中给出了公式的详细推导过程；之后，根据节点碳排放因子，确定不同用户的非交易负荷碳排放分量和网损碳排放分量，计算表达式分别如式(14)、(15)所示：

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{N,t}^{NA} = [\mathbf{P}_{F,t}^{NA} - (\mathbf{P}'_{B,t}^{NA})^T]^{-1} (\mathbf{P}_{G,t}^{NA})^T \boldsymbol{\varepsilon}_G^{NA} \quad (13)$$

式中： $\boldsymbol{\varepsilon}_{N,t}^{NA}$  为非交易电量部分的系统节点碳排放因子向量， $\boldsymbol{\varepsilon}_{N,t}^{NA} = [\varepsilon_{N1,t}^{NA}, \dots, \varepsilon_{NN,t}^{NA}]^T$ ， $\varepsilon_{Ni,t}^{NA}$  为节点  $i$  在  $t$  时段的非交易电量碳排放因子； $\boldsymbol{\varepsilon}_G^{NA}$  为非交易机组发电碳排放因子向量， $\boldsymbol{\varepsilon}_G^{NA} = [\varepsilon_{G1,t}^{NA}, \dots, \varepsilon_{GK,t}^{NA}]^T$ ， $\varepsilon_{Gk,t}^{NA}$  表示机组  $k$  在  $t$  时段的非交易发电量碳排放因子； $\mathbf{P}_{F,t}^{NA}$  为自然潮流分布下的节点有功通量矩阵， $\mathbf{P}_{F,t}^{NA} = (\mathbf{P}_{Fij,t}^{NA})_{N \times N}$ ，节点有功通量表示流入节点的有功潮流“绝对量”，其可根据非交易机组出力矩阵  $\mathbf{P}_{G,t}^{NA}$  和自然分布支路潮流分布矩阵  $\mathbf{P}'_{B,t}^{NA}$  得到，具体计算过程详见文献[13]。

$$\mathbf{E}_L^{NA} = \sum_{t \in T} \mathbf{P}_{L,t}^{NA} \boldsymbol{\varepsilon}_{N,t}^{NA} \quad (14)$$

$$\mathbf{E}_{BL}^{NA} = \sum_{t \in T} \mathbf{P}'_{BL,t}^{NA} \boldsymbol{\varepsilon}_{N,t}^{NA} \quad (15)$$

式中： $\mathbf{E}_L^{NA}$  和  $\mathbf{E}_{BL}^{NA}$  分别为负荷非交易电量电间接

碳排放分布矩阵和网损间接碳排放分布矩阵， $\mathbf{E}_L^{NA} = [E_{L1}^{NA}, \dots, E_{LM}^{NA}]^T$ ， $\mathbf{E}_{BL}^{NA} = [E'_{BL1}^{NA}, \dots, E'_{BLN}^{NA}]^T$ ， $E_{Lm}^{NA}$  和  $E'_{BLi}^{NA}$  分别为负荷  $m$  的非交易电量间接碳排放量和节点  $i$  上等效网损的间接碳排放。

根据文献[13]中的定义，以节点碳排放因子为基础，也可以进一步计算得到自然潮流分布下的线路碳流率、线路碳流密度等网侧碳信息。此外，从区域用户用电碳排放因子的公平化考虑，对非交易电量的节点碳排放因子进行平均化处理，也能够得到区域平均碳排放因子。

## 5 算例分析

本文首先基于 PJM-5 节点系统开展算例分析，详细分析了电量交易对碳排放分摊结果的影响。之后，基于我国某地市电力系统的实际运行数据，开展算例分析。

在碳排放流计算中，注入系统的发电碳排放量通过各类型机组的典型发电碳排放因子和发电量估算得到。各类型机组的典型发电碳排放因子如表 1 所示<sup>[20-21]</sup>。

表 1 各类型机组的典型发电碳排放因子  
Table 1 Typical carbon emission factors for various types of power generator

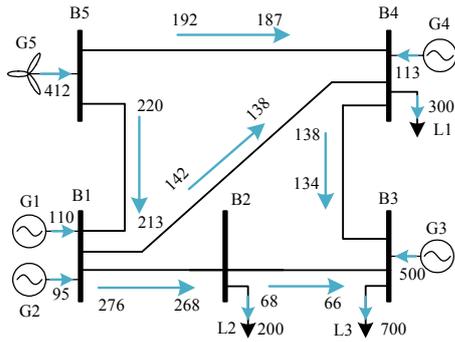
机组类型	取值(tCO <sub>2</sub> /(MW·h))
超超临界 1 000 MW 级燃煤机组	0.793 8
超超临界 600 MW 级燃煤机组	0.806 7
超临界 600 MW 级燃煤机组	0.838 5
亚临界 300 MW 级燃煤机组	0.887 5
亚临界循环流化床 300 MW 级燃煤机组	0.917 1
超高压及以下机组	0.936 3
燃气机组	0.378 9
垃圾发电	1.108
沼气发电	0.23

### 5.1 PJM-5 节点系统算例

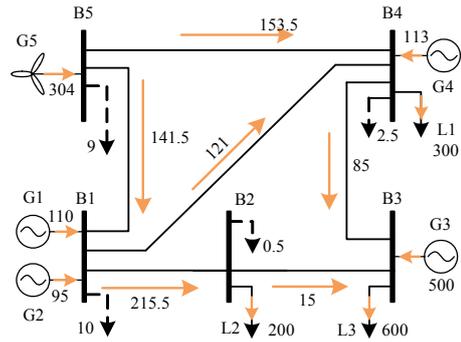
PJM-5 节点系统示意图、系统实际潮流信息以及变换后面向碳流计算的等效无损网络潮流信息如图 4 所示。系统中机组 G1 至 G5 的机组容量、机组类型和对应的发电碳排放因子如表 2 所示。

#### 5.1.1 交易行为对给系统碳流分布带来的影响

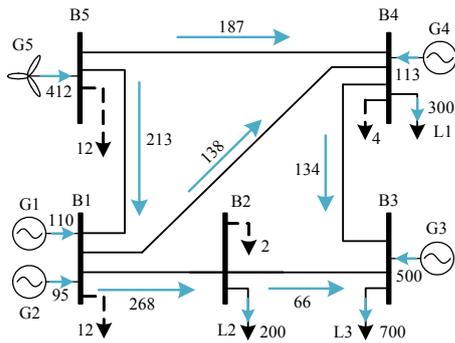
首先分析交易节点对给系统碳流分布带来的影响。假设负荷 L3 和风电场 G5 存在电量合约，且该时段合约电量为 100 MW·h。以负荷 L3 所在节点 3 位参考节点，根据线路参数<sup>[22]</sup>可求得系统 PTFDF 矩阵。并根据本文所提出的拆解步骤对等效无损网络进行潮流拆解，拆解后的交易流潮流信息和自然



(a) 实际潮流信息



(b) 自然分布结果



(b) 等效无损网络潮流信息

图4 PJM-5节点系统潮流信息分布

Fig. 4 Power flow information of PJM-5bus system

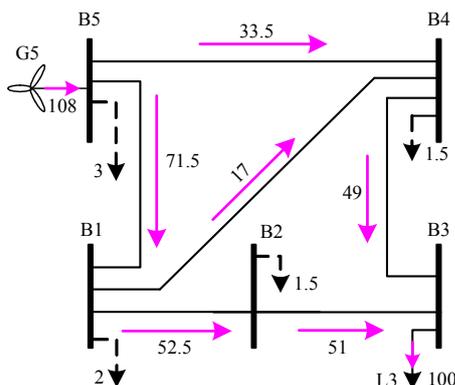
表2 PJM-5节点系统机组信息

Table 2 Information of generator in PJM-5bus system

机组名称	额定容量/MW	机组类型	碳排放因子/(tCO <sub>2</sub> /(MW·h))
G1	110	燃气	0.378 9
G2	110	燃气	0.378 9
G3	600	煤电	0.806 7
G4	300	煤电	0.887 5
G5	500	风电	0

分布潮流信息如图5所示。

根据交易流和自然分布潮流计算得到系统节点碳排放因子。计及交易流前后，各负荷节点中非交易电量的碳排放因子对比图如图6所示。根据碳排放因子信息及用户用电信息，能够得到计及交易流前后各负荷的间接碳排放量信息对比图如图7



(a) 交易流结果

图5 交易流和自然分布潮流的拆解结果

Fig. 5 Carbon flow results under trading distribution and nature distribution

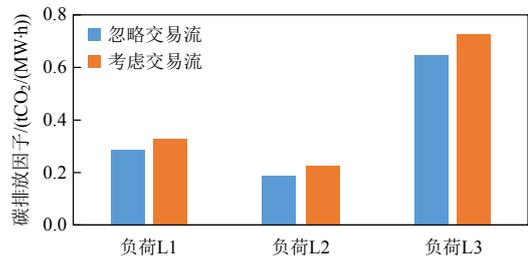


图6 考虑交易流前后负荷节点非交易电量碳排放因子

Fig. 6 Carbon emission factor of loads before and after considering electricity trading

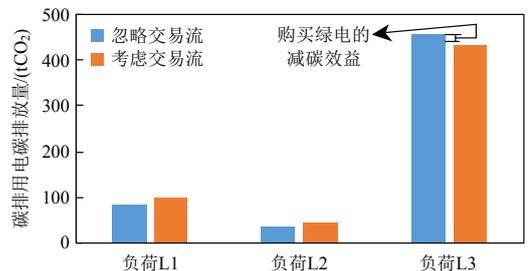


图7 计及交易行为前后各负荷的间接碳排放量对比图

Fig. 7 Indirect carbon emission of loads before and after considering electricity trading

所示。

由于负荷L3和风电场G5间存在电量交易，该交易流相当于将系统中的绿电“定点”输送给了购买绿电的负荷，原本由全系统共享的绿电低碳效益也相应的由绿电购买负荷独享。因此，由图6可以看出，考虑交易流的影响后，各负荷非交易电量部分的碳排放因子均相较于无交易流场景有所增加，也正因如此，未在电力市场中购置绿电的负荷L1和负荷L2的用电碳排放量将比无交易流场景下的用电碳排放量高。对于负荷L3而言，由于开展了绿电交易，尽管其非交易电量部分的用电碳排放因子有所增加，但其总用电碳排放量低于开展绿电交易前的用电碳排放量。

此外，通过对比负荷L3在无交易流场景和开

展绿电交易场景下的间接碳排放信息，也可以得到其通过购置绿电产生的减碳效益，由图 7 所示，负荷 L3 通过购置 100 MW·h 绿电，在该时段实现减少 19.48 t 的 CO<sub>2</sub>。

### 5.1.2 实时无偏性验证

假设 PJM 5 节点系统 20:00—23:00 组出力曲线和各负荷曲线分别如图 8、9 所示。系统中 L3 和 G5 间 20:00—23:00 的电量合同分解结果分别为 100、150、50 和 120 MW·h。

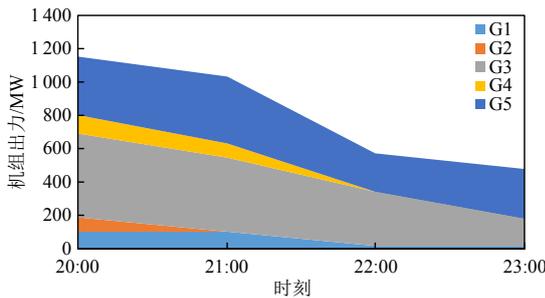


图 8 机组出力曲线

Fig. 8 Curve of unit output

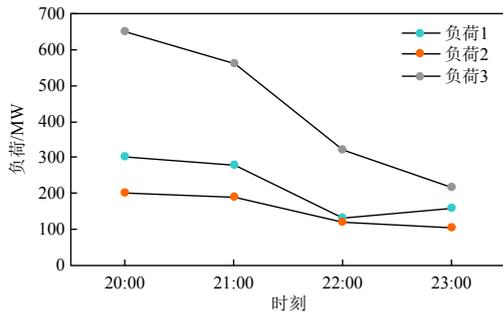


图 9 系统负荷曲线

Fig. 9 Curves of system loads

图 10 展示了各时段系统直接碳排放和间接碳排放的明细。由图 10 可以看出，本文提出的碳计量方法得到的碳计量结果满足实时无偏性：各时段系统总直接碳排放量实时等于各时段间接碳排放量。

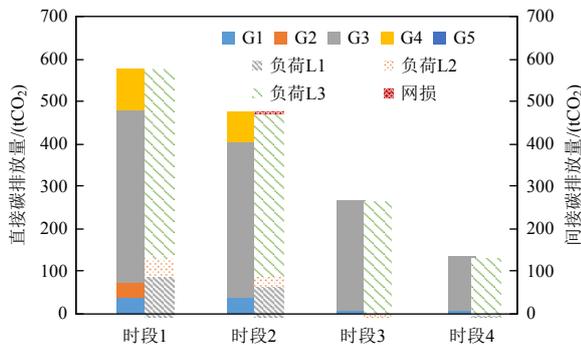


图 10 各时段系统直接碳排放和间接碳排放组成明细

Fig. 10 Direct and indirect carbon emissions of power system in each time period

### 5.1.3 不同电量合约分解结果对系统碳排放责任分摊结果的影响

假设系统 L3 和 G5 间 20:00—23:00 的电量合约分解结果改变，但总电量与 5.1.2 节中一致，改变后 20:00—23:00 的分解结果分别为 50、100、120 和 150 MW·h。两种电量合约分解结果下，非交易流量的碳排放因子曲线如图 11 所示(5.1.2 节中分解结果记作“分解方式 1”，本节分解结果记作“分解方式 2” )。

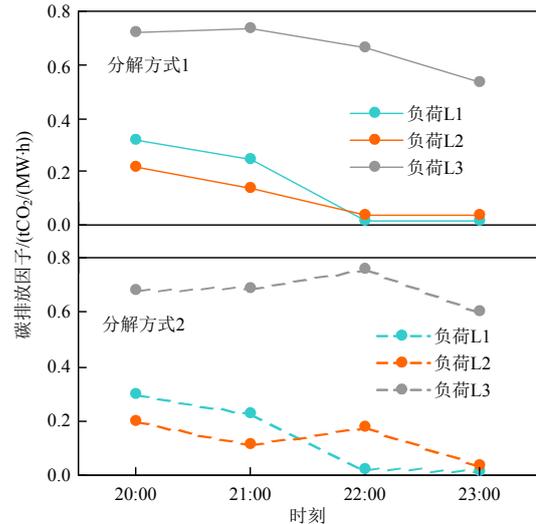


图 11 不同用户非交易电量的用电碳排放因子曲线

Fig. 11 Curves of carbon emission factor for the electricity

首先，由图 11 可以看出，由于不同时段机组出力占比有所不同，用户非交易电量的用电碳排放因子具有时间差异性。低碳需求响应主要以动态碳排放因子为引导信息。因此，采用本文碳计量方法可以兼顾开展低碳需求响应的要求。此外，由图 11 还可以看出，在不同电量合约分解方式下，由于交易流在不同时段抽走的低碳效益不同，因而导致非交易电量的碳排放因子有所不同。

图 12 展示了不同用户在两种合约分解方式下，20:00—23:00 承担的总碳排放责任明细，由图 12 可以看出，尽管合约的不同分解方式将导致用户碳排放责任承担量不同，但是用户侧(包括网损)承担

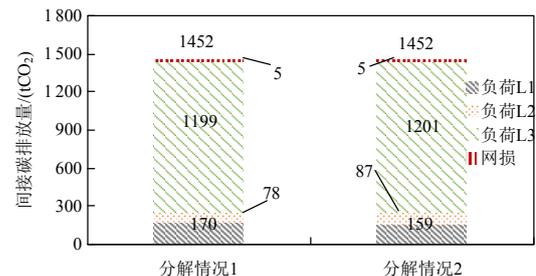


图 12 不同用户非交易电量的用电碳排放因子曲线

Fig. 12 Curves of carbon emission factor for the electricity

的总碳排放量保持不变。换言之,合约的不同分解方式会使得碳排放责任在不同用户间转移,但始终不会影响本计量方法的无偏性。

## 5.2 实际地市级系统算例

为了进一步验证该方法在实际电力系统碳计量领域的应用效果,选取我国某地市电力系统开展算例仿真分析。该地市电力系统的能量来源主要包括本地电源和区外来电,其中,本电源以煤电为主,除煤电以外,还包含燃气、垃圾发电、沼气发电和光伏。基于该系统某日实际机组出力数据和 220 kV 及以上网架潮流数据开展算例仿真计算,系统当日峰值负荷约为 730 万 kW,系统节点数 78 个。假设该系统存在 4 项电量合约,负荷 L1 和负荷 L2 各签订 2 项电量合约;其中,负荷 L1 与签订电量合约的电源节点构成交易节点对  $a$  和  $b$ ,与其签订电量合约的电源均为光伏;负荷 L2 与签订电量合约的电源分别为垃圾电厂和煤电。各交易节点对全天的交易电量曲线如图 13 所示。

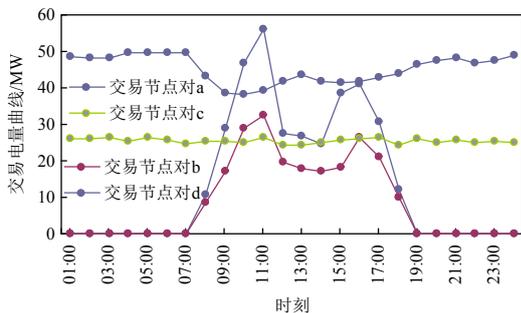


图 13 各交易节点对的交易电量曲线

Fig. 13 Curves of transaction electricity of different transaction node pair

基于系统潮流数据,在系统拓扑当日不变(当日PTDF 矩阵不变)的情况下,采用本文方法能够在 1 min 内计算得到系统各节点负荷碳排放情况和系统碳排放流分布情况(基于 Matlab 2020b 软件, Intel (R) i71260p 处理器/16G 内存电脑开展仿真计算)。

负荷 L1 和负荷 L2 在进行电量交易前后,各时段的用电间接碳排放情况分别如图 14、15 所示。由图 14、15 可以得到,负荷 L1 和负荷 L2 的各时段间接碳排放明细,也可以通过对比得到其在进行电量交易后带来的减碳量和需要多承担的碳排放责任。负荷 L1 通过购置光伏,能够实现全天减少 299.91 tCO<sub>2</sub>; 负荷 L2 在购置煤电和垃圾发电后,将需要多承担 1 368.51 tCO<sub>2</sub> 的排放责任。

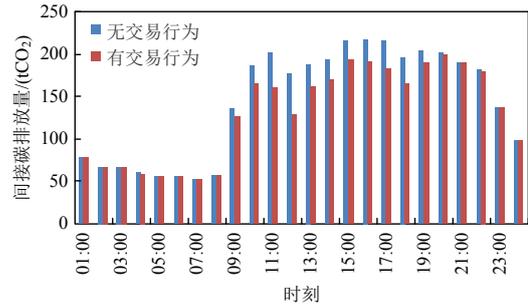


图 14 负荷 L1 进行电量交易前后各时段间接碳排放

Fig. 14 Indirect carbon emission of load L1 before and after participating in electricity market

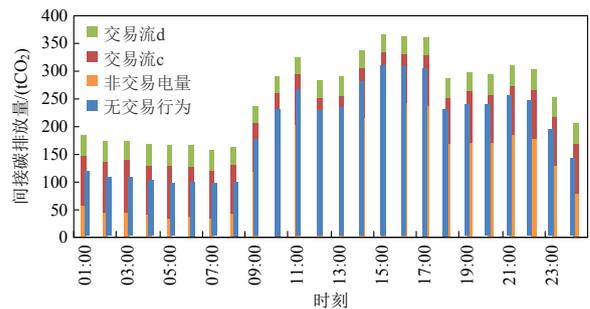


图 15 负荷 L2 进行电量交易前后各时段间接碳排放

Fig. 15 Indirect carbon emission of load L2 before and after participating in electricity market

## 6 结论

本文提出一种计及电量交易信息的用电碳计量技术。该技术根据电力市场中的电量交易数据,将实测的电力潮流数据拆分成交易行为潮流和非交易行为自然分布潮流,基于碳排放流理论分别计算交易电量和非交易电量的碳排放责任,得到考虑电力市场交易行为后的用电碳排放计量结果,该计量结果将支撑用户侧间接碳排放的准确核算,从计量角度支撑电-碳耦合。基于 PJM-5 节点系统数据和我国某地实际系统运行数据开展算例仿真,得到以下结论:

1) 针对交易电量,本文方法能够独立量化每个交易行为背后的碳排放责任,同时厘清该交易行为带来的网损碳排放量,交易电量和非交易电量的碳排放责任独立核算,两者互不干扰,避免重复统计。

2) 针对非交易电量,本方法以当前基于碳排放因子的用电碳计量体系为基础,能够得到面向非交易电量的动态碳排放因子,因而能够兼顾低碳需求响应的引导能力。

3) 通过对比电量交易行为前后的用户用电碳排放量差异,能够量化得到电量交易行为带来的低碳效益(如绿电交易等)和需要额外承担的碳排放责任(如:购买煤电等)。

4) 本文方法适用于大规模电力系统碳排放信

信息的快速求解, 具有良好的工程应用可行性。

## 参考文献

- [1] 国网能源研究院有限公司. 中国能源电力发展展望(2021)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2021.  
State Grid Energy Research Institute Co.,Ltd. China energy & electricity outlook 2021[M]. Beijing: China Electricity Power Press, 2021(in Chinese).
- [2] 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).
- [3] 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): 2806-2818.  
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): 2806-2818(in Chinese).
- [4] 全国碳排放权交易市场上线交易正式启动[N]. 人民日报, 2021-07-17(03).  
The trading of the national carbon emission rights trading market was officially launched[N]. The People's Daily, 2021-07-17(03)(in Chinese).
- [5] 广州碳排放权交易所. 碳市场与绿电交易联动机制实践[R]. 2022-08-12.  
Guangzhou Carbon Emissions Exchange. Practice of linkage mechanism between carbon market and green electricity trading[R]. 2022-08-12(in Chinese).
- [6] 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.  
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]. Proceeding of the CSEE, 2022, 42(8): 2830-2841(in Chinese).
- [7] JI Ling, LIANG Sai, QU Shen, et al. Greenhouse gas emission factors of purchased electricity from interconnected grids[J]. Applied Energy, 2016, 184: 751-758.
- [8] 周全, 冯冬涵, 徐长宝, 等. 负荷侧碳排放责任直接分摊方法的比较研究[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(17): 153-159.  
ZHOU Quan, FENG Donghan, XU Changbao, et al. Methods for allocating carbon obligation in demand side: a comparative study[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 153-159(in Chinese).
- [9] RUIZ P A, RUDKEVICH A. Analysis of marginal carbon intensities in constrained power networks[C]//2010 43rd Hawaii International Conference on System Sciences. Honolulu, HI, USA: IEEE, 2010: 1-9.
- [10] 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).
- [11] 龚昱. 基于碳流追踪的绿色电力市场用户侧研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.  
GONG Yu. Research on green power market at power consumer side based on carbon flow tracing[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015(in Chinese).
- [12] 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).
- [13] 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).
- [14] 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).
- [15] CHENG Yaohua, ZHANG Ning, WANG Yi, et al. Modeling carbon emission flow in multiple energy systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 3562-3574.
- [16] 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).
- [17] 践行碳达峰碳中和, 推进源网荷碳计量——全国首个电力系统“源网荷”实体碳表系统及能源碳计量平台在江苏常州正式上线[EB/OL]. (2021-09-29)[2022-08-12]. <https://www.eea.tsinghua.edu.cn/info/1038/3122.htm>. Promote the implementation carbon peak carbon neutrality target and promote source-grid-load carbon measurement - the first power system "source-grid load" physical carbon meter system and energy carbon measurement platform were officially launched in Changzhou, Jiangsu. [EB/OL]. (2021-09-29)[2022-08-12]. <https://www.eea.tsinghua.edu.cn/info/1038/3122.htm>(in Chinese).
- [18] 清华大学与国网江苏省电力有限公司联合发布全国首个电力系统全景碳排放流分析平台与“eCarbon+”智慧碳服务品牌[EB/OL]. (2022-04-26)[2022-08-12]. <https://www.eea.tsinghua.edu.cn/info/1038/5085.htm>. Tsinghua University and State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. jointly launched the first panoramic power system carbon emission flow analysis platform and the "eCarbon+" smart carbon service brand in China. [EB/OL]. (2022-04-26)[2022-08-12]. <https://www.eea.tsinghua.edu.cn/info/1038/5085.htm>(in Chinese).
- [19] 张伯明, 陈寿孙, 严正. 高等电力网络分析[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2007.  
ZHANG Boming, CHEN Shousun, YAN Zheng. Advanced power network analysis[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2007(in Chinese).
- [20] 福建省生态环境厅. 关于《福建省2018、2019年度碳排放配额分配实施方案》(征求意见稿)的公示[EB/OL]. (2019-05-20)[2022-02-05]. [http://sthjt.fujian.gov.cn/zwgk/gsgg/201905/t20190520\\_4879610.htm](http://sthjt.fujian.gov.cn/zwgk/gsgg/201905/t20190520_4879610.htm). Fujian Provincial Department of Ecology and Environment. Announcement on the "Fujian Province 2018 and 2019 carbon emission allowance allocation implementation Plan"(Draft for Comments)[EB/OL]. (2019-05-20)[2022-02-05]. [http://sthjt.fujian.gov.cn/zwgk/gsgg/201905/t20190520\\_4879610.htm](http://sthjt.fujian.gov.cn/zwgk/gsgg/201905/t20190520_4879610.htm)(in Chinese).
- [21] 中华人民共和国生态环境部. 2019年度中国区域电网二氧化碳基准线排放因子BM计算说明[R]. 2020. Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Instructions for calculating the carbon dioxide baseline emission factor BM of China's regional power grids in 2019 [R]. 2020(in Chinese).
- [22] LI Fangxing, BO Rui. Small test systems for power system economic studies[C]//IEEE PES General Meeting. Minneapolis, MN, USA: IEEE, 2010.



李姚旺

在线出版日期: 2023-04-25。

收稿日期: 2022-08-29。

作者简介:

李姚旺(1993), 男, 博士后, 主要从事低碳电力技术、云储能、压缩空气储能等研究工作, [yaowang\\_li@126.com](mailto:yaowang_li@126.com);

\*通信作者: 张宁(1985), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事低碳电力技术、电力系统规划与运行、多能源系统等研究工作, [ningzhang@tsinghua.edu.cn](mailto:ningzhang@tsinghua.edu.cn)。

(编辑 乔宝榆, 李新洁)

# Electricity Carbon Metering Method Considering Electricity Transaction Information

LI Yaowang<sup>1</sup>, LIU Yuliang<sup>2</sup>, YANG Xiaobin<sup>3</sup>, HE Wei<sup>3</sup>, FANG Yujuan<sup>1</sup>, DU Ershun<sup>1</sup>, ZHANG Ning<sup>1\*</sup>, LI Jia<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Power System and Generation Equipment (Department of Electrical Engineering, Tsinghua University);  
2. Sichuan Energy Internet Research Institute, Tsinghua University; 3. State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd.)

**KEY WORDS:** new-type power system; carbon metering; electricity market; carbon market; carbon emission flow theory

Exploiting the electricity-carbon coupling value and establishing an electricity-carbon synergistic market is important for achieving Carbon peak and neutralization targets. The coupling of electricity carbon information relies on a reasonable and effective electricity carbon measurement system. However, the current electricity carbon measurement system still needs to be improved. It is difficult to fully clarify the carbon emission responsibilities within electricity trading behavior.

This paper proposes a new electricity carbon metering method considering the electricity trading behavior and based on the theory of carbon emission flow. The diagram of sharing demand side carbon emission responsibility is shown in Fig. 1.

and the natural distribution power flow; the power flow from transaction electricity transmission is disassembled from the actual power flow with the Power Transfer Distribution Factor (PTDF); the net losses from transaction electricity transmission and non-transaction electricity transmission are also distinguished according to their contribution to the actual net loss.

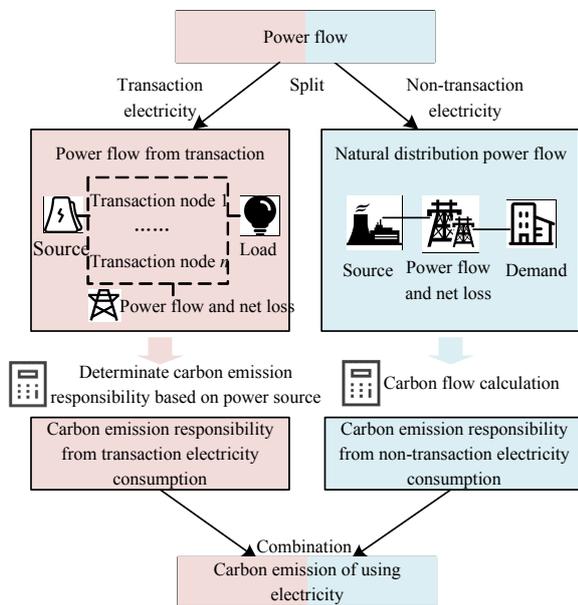
Step 3: independently accounting for carbon emission responsibilities from the transaction electricity and the non-transaction electricity; the carbon emission responsibility from transaction electricity can be determined by the carbon emission factor of the power source participating in the electricity market; the carbon emission responsibility from non-transaction electricity can be determined through the node carbon emission factor. The node carbon emission factor is calculated based on the carbon flow theory with natural distribution information:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{N,t}^{NA} = [\mathbf{P}_{F,t}^{NA} - (\mathbf{P}_{B,t}^{NA})^T]^{-1} (\mathbf{P}_{G,t}^{NA})^T \boldsymbol{\varepsilon}_G^{NA} \quad (1)$$

where  $\boldsymbol{\varepsilon}_{N,t}^{NA}$  is the matrix of node carbon emission factor;  $\mathbf{P}_{F,t}^{NA}$  is the matrix of node injected power flow;  $\mathbf{P}_{B,t}^{NA}$  is the matrix of power transmission flow;  $\mathbf{P}_{G,t}^{NA}$  is the matrix of generation output;  $\boldsymbol{\varepsilon}_G^{NA}$  is the matrix of generation carbon emission factor.

Step 4: obtaining carbon emission responsibility of using electricity; with the combination of carbon emission responsibility from the transaction and non-transaction electricity, the total indirect carbon emission responsibility of using electricity can be determined.

Based on operation profiles from the PJM-5 bus system and the power system of a city in China, the simulation analysis is carried out. The simulation results verify the effectiveness of the proposed method. The results also show great potential in practical operation.



**Fig. 1** Diagram of sharing demand side carbon emission responsibility

The method is divided into four steps:

Step 1: obtaining equivalent lossless network; the actual lossy network is equivalent to a lossless network considering the calculation characteristics of the carbon emission flow theory.

Step 2: obtaining power flow from the transaction