

电力系统全环节碳计量方法与碳表系统

张宁¹, 李姚旺², 黄俊辉³, 李瑶虹³, 杜尔顺², 李明轩², 刘昱良², 康重庆²

(1. 新型电力系统运行与控制全国重点实验室(清华大学), 北京市 100084;

2. 清华四川能源互联网研究院, 四川省成都市 610213; 3. 国网江苏省电力有限公司, 江苏省南京市 210000)

摘要: 电力行业是中国煤炭消耗和碳排放最大的单一行业。实时、准确、全面的计量电力碳排放是挖掘电力碳减排潜力、引导电力用户互动减碳的基础与前提,也是支撑碳市场的数据基础。为此,以联合国气候变化公约提出的“可测量、可报告、可核实”的“三可”原则为基本设计理念,基于电力系统碳排放流分析理论,提出了电力系统全环节碳计量方法,实现电力系统源、网、荷三侧电碳信息的“分钟级”实时碳计量和“用户级”精细碳计量。在此基础上,设计了电力系统全环节碳计量系统,介绍了电力碳表系统的基本概念和实现形式。基于中国江苏常州市的实际系统运行数据和负荷数据开展了仿真验证,仿真结果验证了所提方法的有效性。最后,对电力能源系统碳计量领域需要进一步研究的关键问题进行了展望。

关键词: 碳计量; 碳核算; 碳排放流; 碳表系统; 电碳平台; 碳排放因子

0 引言

当前,全球多数国家已就21世纪中叶实现“碳中和”达成共识^[1]。通过能源供给低碳化、能源消费电气化,构建以新能源为主体的新型电力系统,已成为诸多国家的重要能源战略。

在中国碳排放组成中,电力行业是煤炭消耗和碳排放最大的单一行业^[2-3]。不同于其他能源系统,电力系统具有严格的“发电-用能”实时平衡特性,而电网连接着电力生产和消费,是重要的能源网络平台,是引领电力碳减排的核心枢纽,既要保障新能源大规模开发和高效利用,又要满足经济社会发展的用电需求。以上特性决定了电力系统的“减碳”绝不仅仅是源侧的任务,也需要源、网、荷全环节的协同配合。因此,电力系统中的碳计量问题不仅需要包含对源侧直接碳排放的计量,更需要包含对网侧和荷侧间接碳排放的计量。实时、准确、全面计量电力系统源、网、荷全环节的碳排放是掌握电力行业碳排放现状与趋势、挖掘电力碳减排潜力、引导电力用户互动减碳、促进电力经济低碳转型的基础与前提,也是支撑碳市场健康发展的基础保障。

目前,碳计量方法与标准已受到国内外政府与研究机构的高度关注。国际上公认的碳计量原则是

2007年《联合国气候变化公约》第13次缔约方会议在《巴厘行动计划》中提出的“三可”原则,即可测量、可报告、可核实^[4]。2021年12月31日,中共中央国务院在《计量发展规划(2021—2035年)的通知》中特别指出,要“完善温室气体排放计量监测体系,加强碳排放关键计量测试技术研究和应用,健全碳计量标准装置,……,开展多行业典型用能设施及用能系统碳排放计量测试方法研究和碳排放基准数据库建设^[5]”。2022年10月18日,国家市场监督管理总局等九部门联合印发了《建立健全碳达峰碳中和标准计量体系实施方案》,对中国碳计量标准体系的构建提出了更加明确的要求:“到2025年,碳达峰·碳中和标准计量体系基本建立”;“到2030年,碳达峰·碳中和标准计量体系更加健全”;“到2060年,技术水平更加先进、管理效能更加突出、服务能力更加高效、引领国际的碳中和标准计量体系全面建成^[6]”。

目前,电力系统源、网、荷全环节的精确碳排放计量理论、方法、标准与设备还尚未完善。现阶段电力系统的直接碳排放计量主要基于宏观统计法^[7],即根据全年、全省/大区的发电总燃料消耗换算得到总碳排放量^[8]。中国的用电间接碳排放计量主要基于平均碳排放因子法^[9],该方法基于省级或大区电网级全年燃料统计值和发电量计算得到用户的单位用电碳排放因子,通过平均碳排放因子与用电量得到用户的用电间接碳排放量。中国现行的碳计量方法具有简单、可信、易操作等优点,但同时具有以下

收稿日期: 2022-10-21; 修回日期: 2023-02-13。

上网日期: 2023-03-27。

国家自然科学基金重点项目(52130702)。

劣势。

1)难以反映碳排放因子的空间差异性。在空间尺度上,平均用电碳排放因子的最小分辨率为省级,同省份内不同地市、区县的用户在用电碳排放方面的差异性无法体现。随着“整县光伏”等新能源政策的出台与应用,不同地市、区县用户的单位用电含碳量将具有显著差异,基于平均碳排放因子的碳计量方法将逐渐产生不公平性。

2)难以反映碳排放因子的时间差异性。在时间尺度上,平均碳排放因子的更新周期为1年。随着新型电力系统建设进程的不断推进,新能源电量占比不断提升,用户在不同时段的单位用电含碳量将存在显著差异,但采用全年固定的平均碳排放因子无法反映该差异。

3)无法厘清电网侧损耗的碳排放责任。现行碳计量方法将发电侧的直接碳排放量完全转移到了用户侧,忽略了不同地区网络损耗所对应的间接碳排放量,导致该分摊方式无法体现电网侧的碳排放责任。此外,部分学者提出从全寿命周期的角度出发,开展电力系统碳排放的分析与统计,统计口径涵盖能源设施的原材料、生产制造、运行管理、检修维护直到退役报废的全生命周期过程^[10-11]。该方法可以给出能源设施在各个阶段的碳排放明细,分析影响总碳排放的关键因素,指明碳减排的方向^[12-13]。但是,该方法仍然缺乏对电力系统物理特性的考虑,无法明晰碳排放量在电力系统中的时空转移机理。

因此,面向现有研究中的不足,亟须从电力系统全环节碳计量的角度出发,以“三可”原则为设计原则,研究能够反映碳排放因子时空差异性和网侧碳排放责任的碳排放计量方法,并开发相应的碳计量装置,更加实时、精细地核算电力系统碳排放,准确把握电力系统碳排放现状及排放趋势,引导电力系统上下游协同减排,加速能源电力低碳转型。

为此,本文首先详细分析了电力行业碳计量中的“三可”原则内涵,提出了面向电力系统源-网-荷精准、实时碳计量的理论体系。然后,以此为理论基础,提出了电力系统全环节碳计量系统。基于中国江苏常州电网的实际数据开展仿真计算,以验证所提碳计量方法的有效性。最后,对电力系统碳计量领域的部分关键问题进行了展望。

1 电力碳计量中的“三可”原则

“三可”原则是目前国际上广泛认可的温室气体排放量计量原则。其在提出之际主要面向国家减排行动^[4],但随着碳减排进程的不断深入,该原则逐渐

成为能源、交通、建筑、化工等诸多行业的碳计量基本原则。“三可”原则的技术含义描述如下:可测量,主要指采取对策本身和对策的结果是可测量的;可报告,能够按照《联合国气候变化框架公约》或其他达成一致的方式进行报告;可核实,能够通过协商一致的方式进行核实,包括国内和国际核实^[4]。

电力系统中的碳计量问题包含对直接碳排放的测量和对间接碳排放的测量。其中,基于发电燃料消耗法的直接碳排放测量方法是全球广泛应用的主流方法之一。2006年,联合国气候变化委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)颁布了各类燃料的典型碳排放因子^[14],为基于燃料消耗的发电直接碳排放测量方法提供了参考。该测量方法已形成诸多技术标准或行业标准,受到了国际上的广泛认可,不论是测量对策本身,还是测量的结果,都能够满足“三可”原则。近年来,为了实现更加自动化的碳排放连续监测,基于烟气排放连续监测系统的实测法逐渐受到关注。该方法主要通过直接测量排放源的碳排放浓度、流速、流量等数据得到排放源的碳排放量。与发电燃料消耗法相比,实测法自动化程度更高,监测数据实时性更强,但其投入成本相对高昂^[15]。目前,中国仅小部分火电企业安装了二氧化碳排放监测模块,该方法尚未普及。但是,在欧美等发达国家和地区,实测法已获得较为广泛的应用,受到国际上的广泛认可,满足“三可”原则的要求。随着对碳排放计量精度和计量实时性的需求不断提高,实测法预计将在中国受到愈加广泛的关注。

目前,电力碳计量问题中讨论较为激烈、尚未达成一致的部分,主要集中在间接碳排放的计量标准方面。间接碳排放本质上是对直接碳排放的分摊,是一种虚拟的碳排放量,难以进行直接测量与核算。因此,需要论证所提出的间接碳排放计量方法服从“三可”原则。

本文提出的电力系统间接碳排放计量方法服从“三可”原则的基础是电力系统碳排放流理论。具体论述如下:电力系统全环节碳计量方法以源侧实时记录的各类型机组的燃料消耗情况或发电烟气排放数据为直接碳排放量的计量基础,以碳排放流理论为间接碳排放分摊方法,通过给电力潮流打上碳标签的方式实现碳排放溯源,间接碳排放基于电力系统潮流,具有“可测量”性;碳排放流理论仅基于碳排放浓度混合这一条假设即可唯一确定全网的碳排放流,具备广泛公平性,容易使用户达成一致,具有“可

报告”性;通过引入碳表系统,采用区块链技术保障计量数据的不可篡改性和透明度,使得间接碳排放的分摊结果透明公开、有迹可循,使碳排放强度“可核实”。

2 电力系统全环节碳计量理论

2.1 面向新型电力系统发展需求的电力碳计量原则

除“三可”原则之外,面向中国电力系统实际应用需求和高比例新能源接入背景,电力系统的碳计量方法还应该满足以下几个原则。

1)全面性原则:电力系统碳减排需要依靠源网荷全环节的协同;不仅需要计量源侧发电的直接碳排放和荷侧用电的间接碳排放,还需要厘清网侧的碳排放责任,实现源网荷全环节碳排放实时、精准计量。

2)无偏性原则:任意空间范围内、任意时间段内,用电、外送电、网损间接碳排放之和与发电直接碳排放和受入电间接碳排放之和相等。

3)时间差异性原则:用电碳排放因子应该随着清洁能源在不同时段出力占比的变化而实时变化,从而体现不同时段用电的碳排放差异。

4)空间差异性原则:用电碳排放因子应该能够体现不同空间范围内,清洁能源电量消纳情况差异所带来的用电碳排放因子差异性。

5)公平性原则:一定区域范围内清洁能源所带来的低碳红利应该由区域内的全体用户共享。因此,碳排放因子的空间颗粒度不宜过细,在一定区域内,用户的用电碳排放因子应该实时保持一致。

2.2 基于碳排放流理论的电力系统碳排放度量指标

综合考虑上述原则,本文提出基于碳排放流理论的电力系统源、网、荷全环节碳计量方法,旨在实现电力系统全环节的实时、精准碳计量。

电力系统碳排放流是依附于电力潮流存在且随系统有功潮流定向移动的耦合碳排放,是电力系统中一类虚拟的网络流。直观上,电力系统碳排放流相当于给每条支路上的潮流加上碳排放的标签。唯一给出电力系统碳排放从源侧经过网侧,流向荷侧的路径。碳排放流理论通过耦合潮流的方式实现电力系统碳排放责任的转移与分摊,分摊结果可满足时空差异性原则。

1)直接碳排放量

电力系统中的直接碳排放是电力系统碳排放的

源头,几乎全部来自源侧发电。采用电力系统源侧直接碳排放向量表征电力系统中各时段不同发电厂的直接碳排放数据。直接碳排放量的单位通常为 tCO_2 或 $kgCO_2$ 。

$$F_{G,t} = [F_{G,1,t} \quad F_{G,2,t} \quad \cdots \quad F_{G,K,t}]^T \quad (1)$$

式中: K 为系统中存在发电机注入的节点个数; $F_{G,t}$ 为时段 t 电力系统源侧的直接碳排放向量; $F_{G,k,t}$ 为发电厂 k 在时段 t 的直接碳排放量。

2)间接碳排放量

电力系统中的间接碳排放量包括两个方面:荷侧用电间接碳排放量和网侧网损间接碳排放量。用电间接碳排放量表示在给定时间内用户用电行为在源侧对应产生的直接碳排放量;电力系统中不同用户各个时段的用电间接碳排放数据采用用电间接碳排放向量 $F_{C,t}$ 表征。网损间接碳排放量表示给定时间内与网损相对应的潮流中耦合碳排放的累积量;电力系统中不同支路各个时段的网损间接碳排放数据采用网损间接碳排放量矩阵 $F_{N,t}^{\text{loss}}$ 表征。间接碳排放量的单位通常为 tCO_2 或 $kgCO_2$ 。

$$F_{C,t} = [F_{C,1,t} \quad F_{C,2,t} \quad \cdots \quad F_{C,M,t}]^T \quad (2)$$

$$F_{N,t}^{\text{loss}} = (F_{N,ij}^{\text{loss}})_{N \times N} \quad (3)$$

式中: N 为系统中的节点个数; M 为系统中的用户个数; $F_{C,m,t}$ 为用户 m 在时段 t 的用电间接碳排放量; $F_{N,ij}^{\text{loss}} (i \neq j)$ 为矩阵 $F_{N,t}^{\text{loss}}$ 的非对角元素,表示线路 ij 在时段 t 的支路网损间接碳排放量,对角元素 $F_{N,ii}^{\text{loss}}$ 为0。需要指出的是,本文中所指的碳排放量均为时段 t 内的累积量,并非瞬时值。

3)发电碳排放因子

发电碳排放因子用于表征机组单位发电量所产生的碳排放量,由电力系统发电碳排放因子向量 $E_{G,t}$ 表征。发电碳排放因子的单位为 $tCO_2/(MW \cdot h)$ 或 $kgCO_2/(kW \cdot h)$ 。

$$E_{G,t} = [e_{G,1,t} \quad e_{G,2,t} \quad \cdots \quad e_{G,K,t}]^T \quad (4)$$

式中: $e_{G,k,t}$ 为发电厂 k 在时段 t 的碳排放因子。

4)节点碳排放因子

节点碳排放因子表征该节点所属用户的单位用电间接碳排放量,由电力系统节点碳排放因子矩阵 $E_{C,t}$ 表征。节点碳排放因子的单位通常为 $tCO_2/(MW \cdot h)$ 或 $kgCO_2/(kW \cdot h)$ 。

$$E_{C,t} = [e_{C,1,t} \quad e_{C,2,t} \quad \cdots \quad e_{C,N,t}]^T \quad (5)$$

式中: $e_{C,i,t}$ 为节点 i 在时段 t 的碳排放因子。

5)区域碳排放因子

考虑到“公平性原则”,在实际系统碳计量标准中,可以选择以区县、地市或省级为碳排放计量的单

位空间分辨率,单位空间分辨率范围内的用户用电碳排放因子相等。区域碳排放因子表征区域所属空间范围内,用户的单位用电间接碳排放量,该数据由电力系统区域碳排放因子向量 $E'_{C,z,t}$ 表征。区域碳排放因子的单位通常为 $\text{tCO}_2/(\text{MW}\cdot\text{h})$ 或 $\text{kgCO}_2/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。

$$E'_{C,z,t} = [e'_{c,1,t} \quad e'_{c,2,t} \quad \cdots \quad e'_{c,Z,t}]^T \quad (6)$$

式中: $e'_{c,z,t}$ 为区域 z 在时段 t 的碳排放因子; Z 为区域个数。

6) 碳流率

碳流率包括支路碳流率和网损碳流率两个方面;支路碳流率为单位时间随潮流流过支路的间接碳排放量;网损碳流率表征单位时间附着在潮流网损上的间接碳排放量。碳流率相当于“流速”的概念^[16]。电力系统中不同支路各个时段的支路碳流率和网损碳流率数据分别采用支路碳流率矩阵 $R_{B,t}$ 和网损碳流率矩阵 $R_{BL,t}$ 表示。碳流率的单位通常为 tCO_2/h 或 kgCO_2/s 。

$$R_{B,t} = (R_{B,ij})_{N \times N} \quad (7)$$

$$R_{BL,t} = (R_{BL,ij})_{N \times N} \quad (8)$$

式中: $R_{B,ij}$ 和 $R_{BL,ij}$ ($i \neq j$) 分别为支路 ij 间流过的碳流率和网损碳流率,其对角元素 $R_{B,ii}$ 和 $R_{BL,ii}$ 均为 0;

7) 碳流密度

碳流密度反映支路潮流中的含碳量^[16-17]。电力系统中不同支路各个时段的碳流密度采用碳流密度矩阵 $\rho_{B,t}$ 表征。碳流密度的单位通常为 $\text{tCO}_2/(\text{MW}\cdot\text{h})$ 或 $\text{kgCO}_2/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。

$$\rho_{B,t} = (\rho_{B,ij,t})_{N \times N} \quad (9)$$

式中: $\rho_{B,t}$ 为时段 t 的支路碳流密度矩阵; $\rho_{B,ij,t}$ ($i \neq j$) 为 $\rho_{B,t}$ 的非对角元素,表示支路 ij 间流过潮流的碳流密度,对角元素 $\rho_{B,ii,t}$ 为 0。

2.3 电力系统碳排放度量指标计算方法

基于碳排放流理论计算电力系统碳排放度量指标的流程图如图 1 所示。

1) 源侧碳排放信息计算

在直接碳排放测量方面,主要通过测量发电实时燃料消耗情况换算得到发电直接碳排放量,直接碳排放量 $F_{G,k,t}$ 和燃料间的关系如下:

$$F_{G,k,t} = M_{m',t}^{G,k} \delta_{m'} \quad (10)$$

式中: $M_{m',t}^{G,k}$ 为发电厂 k 在时段 t 消耗化石燃料 m' 的质量; $\delta_{m'}$ 为化石燃料 m' 的碳排放因子。不同类型化石燃料的碳排放因子参考中国或 IPCC 颁布的数值^[14]。

此外,对于安装了烟气排放连续监测系统的电

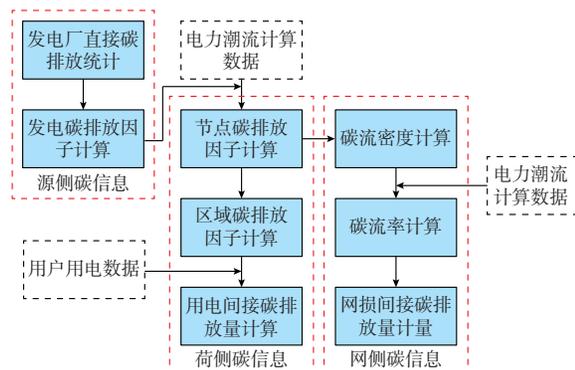


图 1 基于碳排放流理论的电力系统碳排放指标计算过程
Fig. 1 Calculation process of carbon emission index of power system based on carbon emission flow theory

厂,发电直接碳排放 $F_{G,k,t}$ 也可以通过直接测量获得。

在发电碳排放因子方面,可基于发电厂实时测得的直接碳排放计量数据和机组发电量数据计算得到:

$$e_{G,k,t} = \frac{F_{G,k,t}}{P_{G,k,t} \Delta t} \quad (11)$$

式中: $P_{G,k,t}$ 为发电厂 k 在 t 时段的发电功率; Δt 为单位碳计量时间间隔。

2) 荷侧碳排放信息计算

节点碳排放因子与支路碳流间的关系如图 2 所示。在碳排放流理论中,节点碳排放因子由接入该节点的发电机组产生的碳排放流和从其他节点流入该节点的碳排放流共同作用决定,从同一节点流出的各条线路的碳流密度均相等,且等于节点的用电碳排放因子。

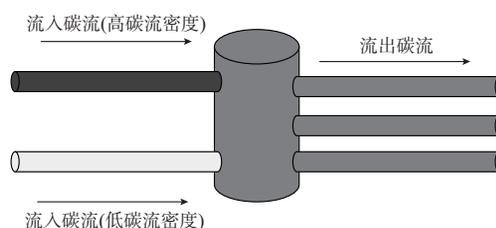


图 2 节点和线路碳排放流示意图
Fig. 2 Schematic diagram of carbon emission flows of nodes and lines

根据节点碳排放因子的定义,针对系统中的节点 i ,该节点的碳排放因子 $e_{c,i,t}$ 为(假设发电厂 k 在节点 i):

$$e_{c,i,t} = \frac{\sum_{s \in \Omega_i^+} P_{B,s,t} \rho_{B,s} + P_{G,k,t} e_{G,k,t}}{\sum_{s \in \Omega_i^+} P_{B,s,t} + P_{G,k,t}} \quad (12)$$

式中: Ω_i^+ 为有潮流流入节点 i 的支路集合; $P_{B,s,t}$ 为支

路 s 在时段 t 的潮流数据; $\rho_{B,s}$ 为支路 s 的碳流密度。上述原则效仿了热力系统中水流温度的混合原则, 为碳排放流提供了广义的支路方程; 此外, 碳排放守恒的原则为碳排放流提供了节点碳排放平衡方程。因此, 通过上述原则可唯一确定系统的碳排放流。

基于系统潮流计算结果, 定义系统有功通量矩阵、线路潮流分布矩阵和发电机组出力矩阵, 表达式分别如式(13)至式(15)所示^[15-16]。

$$\begin{cases} P_{N,t} = (P_{N,ij,t})_{N \times N} \\ P_{N,ii,t} = \sum_{s \in \Omega_s^+} P_{B,s,t} + P_{G,ki,t} \end{cases} \quad (13)$$

$$P_{B,t} = (P_{B,ij,t})_{N \times N} \quad (14)$$

$$\begin{cases} P_{G,t} = (P_{G,ki,t})_{K \times N} \\ P_{G,t} = \text{diag}(P_{G,1,t}, P_{G,2,t}, \dots, P_{G,K,t})J \end{cases} \quad (15)$$

式中: $P_{N,t}$ 为时段 t 节点有功通量矩阵, 该矩阵为 N 阶对角矩阵, 用于表征潮流方向下流入节点的有功潮流“绝对量”, 矩阵中对角项 $P_{N,ii,t}$ 为节点 i 的有功通量; $P_{B,t}$ 为时段 t 线路潮流分布矩阵, 其用于描述电力系统的有功潮流分布, 该矩阵的所有非对角元素 $P_{B,ij,t}$ ($i \neq j$) 为支路 ij 间流过的潮流, 对角元素 $P_{B,ii,t} = 0$; $P_{G,t}$ 为时段 t 发电机组出力矩阵, 其矩阵元素 $P_{G,ki,t}$ 的定义为: 当第 k 台发电机组接入节点 i 且时段 t 注入节点 i 的有功潮流为 p , 则 $P_{G,ki,t} = p$, 否则 $P_{G,ki,t} = 0$; 发电机组出力矩阵 $P_{G,t}$ 可根据机组出力序列向量 $[P_{G,1,t}, P_{G,2,t}, \dots, P_{G,K,t}]^T$ 计算得到; J 为机组拓扑分布矩阵, 用于表征发电机组分布和接入系统中的情况, 具体定义为: $J = (J_{ki})_{K \times N}$, 若第 k 台机组接入系统第 i 个节点 ($k=1, 2, \dots, K; i=1, 2, \dots, N$), 则 $J_{ki} = 1$, 否则 $J_{ki} = 0$ 。

系统节点碳排放因子矩阵计算表达式为^[16]:

$$E_{C,t} = (P_{N,t} - P_{B,t}^T)^{-1} P_{G,t}^T E_{G,t} \quad (16)$$

根据式(16)得到系统各节点碳排放因子, 结合节点的空间所属关系, 计算得到区域碳排放因子 $e'_{C,m,t}$ 为:

$$e'_{C,m,t} = \frac{\sum_{j \in U} P_{L,j,t} e_{C,j,t}}{\sum_{j \in U} P_{L,j,t}} \quad (17)$$

式中: U 为区域电网 n 所覆盖范围内的节点集合; $P_{L,j,t}$ 为节点 j 在时段 t 的负荷功率。

根据区域碳排放因子, 用户各个时段的用电间接碳排放量可由式(18)量化得到。

$$F_{C,m,t} = e'_{C,m,t} P_{L,m,t} \Delta t \quad (18)$$

式中: $F_{C,m,t}$ 为用户 m 在时段 t 的用电间接碳排放; $P_{L,m,t}$ 为用户 m 在时段 t 的用电功率, 用户 m 位于区

域电网 n 内。

3) 网侧碳排放信息计算

由于从同一节点流出的各条线路的碳流密度均相等的节点用电碳排放因子, 根据节点用电碳排放因子矩阵, 线路碳流密度矩阵可由式(19)计算得到。

$$\rho_{B,t} = \text{diag}(E_{C,t}) \mathbf{H} \quad (19)$$

式中: $\rho_{B,t}$ 为时段 t 的线路碳流密度矩阵, 其用于描述系统中各线路的碳流密度; \mathbf{H} 为表征支路潮流流向关系的矩阵, $\mathbf{H} = (H_{ij})_{N \times N}$, 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, 则元素 $H_{ij} = 1$, $H_{ji} = 0$; 若流经该支路的有功潮流为反向潮流, 则 $H_{ij} = 0, H_{ji} = 1$ 。

根据线路网损数据, 定义线路网损分布矩阵为:

$$P_{BL,t} = (P_{BL,ij,t})_{N \times N} \quad (20)$$

式中: $P_{BL,t}$ 为时段 t 的线路网损分布矩阵, 其用于描述电力系统的网损分布; $P_{BL,ij,t}$ ($i \neq j$) 为矩阵 $P_{BL,t}$ 的非对角元素, 表示支路 ij 间流过潮流的网损, 对角元素 $P_{BL,ii,t}$ 为 0。

根据线路潮流分布矩阵、网损分布矩阵与线路碳流密度矩阵, 可以计算得到线路碳流率与网损碳流率:

$$R_{B,t} = \rho_{B,t} P_{B,t} \quad (21)$$

$$R_{BL,t} = \rho_{B,t} P_{BL,t} \quad (22)$$

根据网损碳流率定义, 线路网损间接碳排放量可由式(23)计算得到。

$$F_{N,t}^{\text{loss}} = \Delta t R_{BL,t} \quad (23)$$

在以上关键指标中, 源侧发电直接碳排放量、荷侧用电间接碳排放量和网侧网损间接碳排放量是与碳排放量相关的关键指标, 其表征电力系统源、网、荷全环节碳排放量大小, 将与碳市场与碳交易直接挂钩; 发电和用电碳排放因子是表征发电厂发电清洁水平和用户用电清洁水平的关键指标, 其对于找到影响电网低碳水平的“症结”具有关键指导意义; 线路碳流率、线路碳流密度、线路网损碳流率是表征源侧直接碳排放量如何流向用户侧间接碳排放量的关键指标, 使电力系统全景碳排放的流动情况能够有迹可循。

基于碳排放流理论开展电力系统全环节实时、精准碳计量的流程示意图如图3所示。根据各个时段的系统潮流信息和机组发电燃料消耗信息, 进行逐个时段的碳排放流计算, 可得到逐个时段动态变化的节点碳排放因子信息、线路碳流信息和发电碳排放信息等信息等电力系统全环节碳信息。

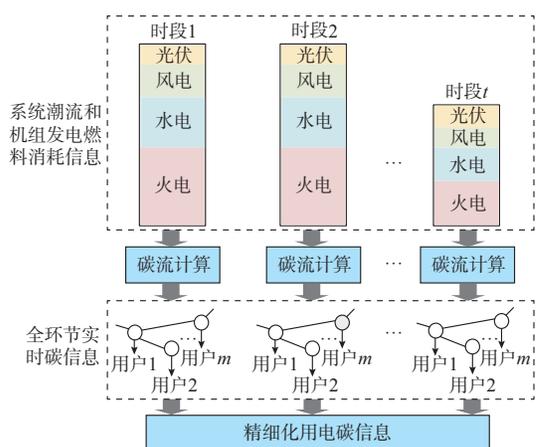


图3 基于碳排放流理论的系统实时、精准碳计量示意图
Fig. 3 Schematic diagram of systemic real-time and accurate carbon measurement based on carbon emission flow theory

电力系统全环节碳计量方法可实现与其输入潮流信息和燃料消耗信息相同的计量时间分辨率。当系统潮流数据和燃料消耗数据进行“分钟级”更新时,本方法可实现“分钟级”实时碳计量。同时,由于本方法以电力潮流信息为基础,其可以精确量化得到不同节点的碳排放因子差异,进而实现“用户级”精细化碳计量。

3 电力系统全环节碳计量系统

基于所提出的电力系统碳计量理论,提出电力系统全环节碳计量系统。该系统主要由分散设置在全网需要计量碳排放的各处的碳表以及网侧电碳平台以及连接各碳表的通信链路组成。电力系统全环节碳计量系统示意图如图4所示。

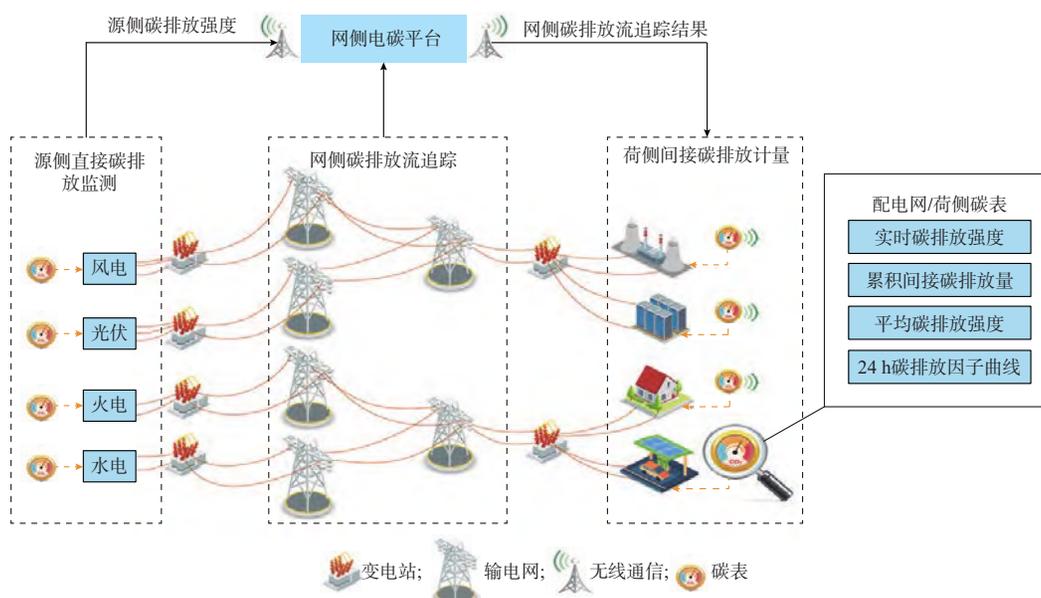


图4 电力系统全环节碳计量系统示意图
Fig. 4 Schematic diagram of carbon meter system for whole chain of power system

电力系统全环节碳计量主要由碳表以及电碳平台通过网络化量测与集中式/分布式计算完成。碳表是用于实时测量和记录电力系统碳排放流基本指标的表计,其根据所安装位置的不同,可以分为:源侧、网侧和荷侧碳表3类。源侧碳表安装在发电侧,其可以通过发电厂烟气传感器实时测量发电厂碳排放,或通过实时发电燃料消耗及燃料排放因子换算得到实时发电碳排放量,并将发电厂直接碳排放发送至网侧电碳平台;网侧碳表安装在输电网与配电网变电站以及跨省跨区电网计量关口,其通过与网侧电碳平台或其他碳表通信,实时计算线路碳流率、线路碳流密度、网损碳流率、网损间接碳排放量;荷侧碳表可直接集成在智能电表,其采集用户用电

功率信息和用户电气位置信息,根据网侧碳表信息,通过与网侧电碳平台以及其他碳表之间通信得到用电间接碳排放、用电碳排放因子信息,并记录用户累积碳排放。

网侧电碳平台根据源侧直接碳排放计量结果,基于输电网潮流状态估计信息,采用碳排放流计算方法对网侧碳排放流碳排放进行追踪,并将碳排放追踪结果发送至网侧及荷侧碳表。需要指出的是,输电网往往具备完善的电气量量测系统,因此其碳排放追踪可基于状态估计信息在电碳平台上完成,而对于配电网以及用电侧,其碳计量可以因地制宜采用不同的方法,对于有状态估计信息的部分,可采用集中计算的方式计算碳排放流并发送给碳表,对

于没有状态估计信息的部分,可采用碳表间分布式通信的方式,通过碳表之间的通信迭代实现碳排放流的分布式计算。为了保障碳计量信息的透明性和不可篡改性,碳表系统中还可引入区块链技术。

4 仿真验证

本文基于中国江苏常州电网某日的实际系统数据与负荷数据开展仿真计算,以验证本文所提碳排放计量方法的有效性与实施效果。

中国江苏常州境内的电能主要有两方面来源:

1)常州本地电源,其中,煤电是最主要的供能来源,此外,还包括燃气、垃圾发电、光伏、沼气等电源类型;2)区外送电量,常州地区的电能主要来源于江苏本地送入、安徽送入和三峡水电送入。

在碳流计算过程中,由于目前系统中尚未全面安装源侧碳表,为了实时量化注入系统中的直接碳排放量,本文采用对应机组的典型发电碳排放因子和机组发电量来进行评估。系统潮流数据来自常州市D5000智能电网调度控制系统,潮流信息更新的时间分辨率为1h。各类型机组的典型发电碳排放因子如表1所示。

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 generators

机组类型	取值/ $(\text{tCO}_2 \cdot (\text{MW} \cdot \text{h})^{-1})$
超超临界1000 MW级机组	0.793 8
超超临界600 MW级机组	0.806 7
超临界600 MW级机组	0.838 5
亚临界300 MW级机组	0.887 5
亚临界循环流化床300 MW级机组	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 0 ^[18]
沼气发电机组	0.230 0 ^[19]

4.1 计量结果分析:计量时空间分辨率分析

根据常州市发电机组实时出力数据、系统实时潮流数据、实时区外来电数据、实时各区域电力负荷数据、系统拓扑链接关系等,结合图1中给出的碳排放流计算步骤,可以计算得到常州市电力系统全环节碳信息。首先,以常州全市作为最小空间尺度,应用本文所提碳计量方法得到的常州市用户用电碳排放因子曲线如图5所示。

由图5可以看出,本文提出的碳计量方法能够实时反映不同时间段用电含碳量的差异性,当用户感知到该信息后,能够根据自身的用电需求和减碳需求,有针对性地调整其用电行为,进而实现减碳。

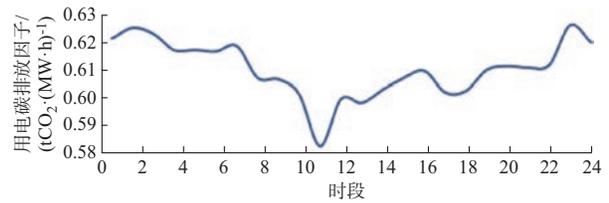


图5 中国常州用电碳排放因子曲线
Fig. 5 Carbon emission factor curve for electricity consumption in Changzhou, China

其次,对比以常州市下属3个区域为最小空间尺度和以常州市为最小空间尺度的用电碳排放量结果差异。对比情况如图6所示。

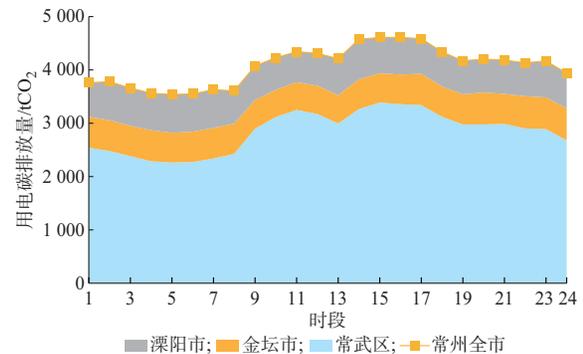


图6 不同空间尺度下中国常州市各区域碳排放情况
Fig. 6 Regional carbon emissions with different spatial scales in Changzhou, China

由图6可知,以常州全市作为最小空间尺度时,所得到的用电碳排放总量为9.7万 tCO_2 ,而以常州下属3个区域作为最小空间尺度时,所得到的用电碳排放总量分别为6.8万 tCO_2 、1.3万 tCO_2 、1.6万 tCO_2 ,3个区域总量为9.7万 tCO_2 ,与以常州全市作为最小空间尺度的计算结果实时保持一致。因此,可以看出,本文提出的碳计量方法能够反映碳排放因子的空间差异性特性,但单位空间尺度的改变不会影响用电碳排放总量的计量结果,只是随着单位空间尺度的缩小,本文所提碳计量方法可以得到更高空间分辨率的用电碳计量结果。

4.2 计量结果分析:实时无偏性验证

为了验证本文所提方法的无偏性,对比碳计量结果中等效发电碳排放与等效用电碳排放的差异。常州地区各个时段等效发电与用电碳排放情况如图7所示。

由图7可知,各个时段的网侧网损间接碳排放量与荷侧用电间接碳排放量之和,实时等于本地发电碳排放和区外来电的等效发电碳排放量。计量结果表明本文提出的碳计量方法具有实时无偏性的特征。

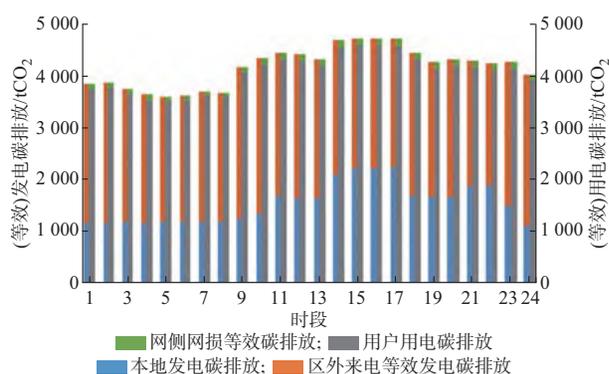


图7 中国常州的等效发电与等效用电碳排放
Fig.7 Carbon emissions from equivalent electricity generation and equivalent electricity consumption in Changzhou, China

4.3 计量结果分析:网损碳排放分析

本文提出的碳计量方法还能够对区域内各条线路的网损碳排放进行计量。图8展示了常州市两条典型线路的全天网损碳排放情况(线路I:空港变至吕墅变,线路II:武南变至马杭变)。

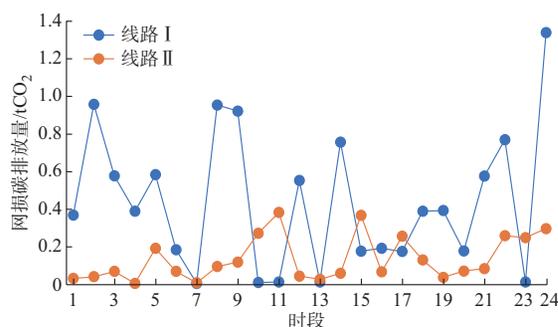


图8 中国常州典型线路的网损碳排放
Fig.8 Carbon emissions of network loss for typical line in Changzhou, China

影响线路网损碳排放量的因素主要包括两个方面:网损大小和线路碳流密度。在线路碳流密度相差不大的情况下,网损越大的线路所产生网损间接碳排放量越大;同时,在网损水平相当的情况下,线路碳流密度越大,所产生的网损间接碳排放量越大。在图8中,由于线路II传输的电能中水电占比较高(来自三峡水电),其碳流密度较低。因此,尽管线路II的网损略大于线路I,但其网损碳排放量却相对较低。

4.4 支撑应用分析:低碳需求响应效果分析

基于本文碳计量方法得到的时变动态碳排放因子是支撑用户开展低碳需求响应的关键引导信号^[20-21]。本文基于江苏常州某纺织厂的原始网供电负荷数据和常州市网供电碳排放因子数据(如图5所示)评估其参与低碳需求响应后的减碳效果。该

纺织厂有一个约440 kW/3 960 kW·h的储能装置可作为柔性负荷进行响应。假设该纺织厂以全天减碳量最大为目标,对储能装置进行优化调度。此外,假设储能装置的初始电量为3 000 kW·h,且要求进行低碳需求响应后储能装置全天初始时段储能电量与末时段储能电量保持不变。

计算得到进行低碳需求响应前后,纺织厂的负荷变化情况和各个时段用电间接碳排放量及全天用电碳排放分别如图9和图10所示。

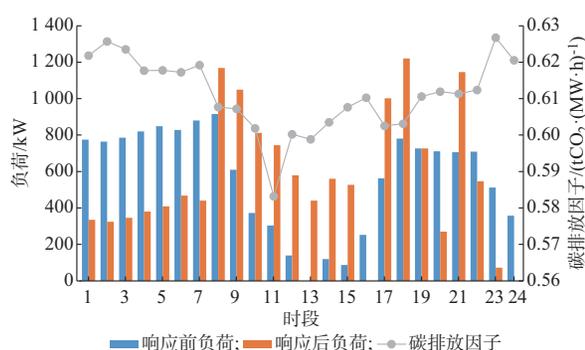


图9 纺织厂在低碳需求响应前后的负荷
Fig.9 Load of textile mills before and after low-carbon demand response

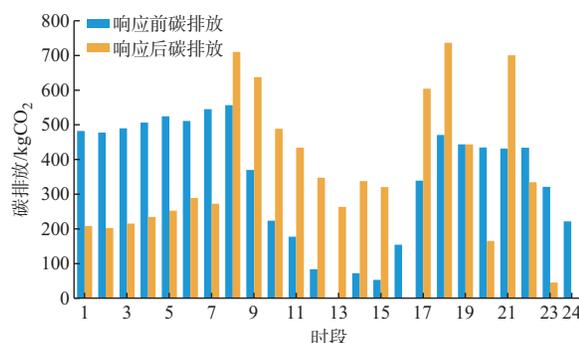


图10 纺织厂在低碳需求响应前后的碳排放
Fig.10 Carbon emissions of textile mills before and after low-carbon demand response

由图9可以看出,该纺织厂在感知到不同时段用电碳排放因子之后,可以选择在碳排放因子较低的时段多用电,并在碳排放因子相对较高的时段少用电的方式,实现用电碳排放量的削减。由图10可以看出,根据该日常州用电碳排放因子数据进行评估,该纺织厂通过调节自身用电行为,每日用电间接碳排放量从8 324.2 kgCO₂降低至8 244.3 kgCO₂,单日减碳79.9 kgCO₂。

5 讨论与展望

面向新型电力系统建设和“双碳”目标落实的紧迫发展需求,针对电力系统全环节精准碳计量新方

法的研究已成为亟待解决的问题。未来电力行业碳计量领域的研究工作还存在较多尚未解决的问题。

1) 考虑电力市场交易因素的碳计量方法

在电力市场交易环境下,发电企业与用户间将存在双边交易形式的购电合同,而实际上每一份双边电量合约下都将暗藏碳排放的转移。因此,在电力市场环境下,荷侧碳排放的分摊中不单需要考虑到基于电力潮流的碳排放溯源,还需要考虑市场交易因素的碳排放溯源。为此,未来可以进一步探讨各类型电力市场交易对电力系统碳排放流的影响,并对电力系统碳排放理论进行进一步的深化研究和改进,基于此提出考虑绿证、绿电等市场交易的碳计量方法。

2) 适应电网管理结构的碳计量方法

在国、分、省、地、县五级调度体系中,省级电网调度是电网平衡控制的主体,由省级电网公司主导规划与建设的清洁能源机组所产生的低碳效益应由全省共享。然而,基于潮流自然分布的碳排放责任分摊方法具有“就近原则”特征,即根据潮流流动结果,由于电站发电将优先供应本地消纳,导致清洁能源电站所在地将获得更为显著的低碳效益。因此,考虑到公平性原则,应对面向全省投建的清洁能源电源的低碳效益进行省内共享,研究考虑电网管理结构的碳计量公平性处理方法。

3) 跨能源系统的碳计量理论与装置

在能源互联网的发展背景下,多能源系统协同运行已受到工业界和学术界广泛关注,以电、气、热为代表的典型多能源系统将成为能源系统的重要形态之一。除了电能之外,热能和天然气也是用户的重要终端用能形式,其中热能也属于二次能源,且多能源系统中不同能源间存在耦合与转化过程,如:电制热、电转气、气制热等。因此,在多能源系统中,荷侧的用能碳计量同样不能简单地根据平均用能碳排放因子进行直接核算,而需要将电力系统碳排放流理论进行拓展和延伸,对面向多能源系统的碳排放流理论进行研究和探讨,并基于此提出多能源系统碳计量方法,研发多能源碳表系统。

6 结语

本文以电力系统碳排放流分析理论为基础,提出了电力系统源、网、荷全环节精准、实时碳计量方法。基于所提出的碳计量理论,提出了电力系统全环节碳计量系统。基于江苏常州电网的实际系统运行数据和负荷数据验证了本文所提方法的有效性和

优越性。通过理论与仿真计算得到以下结论:

1) 本文碳计量方法能够实现发电直接碳排放、用电间接碳排放、网损间接碳排放等电碳指标的连续、实时计量,细化电碳计量的时空分辨率,实现“分钟级”、“用户级”实时精准碳计量。

2) 基于电力系统全环节碳计量理论的碳表系统满足电力碳计量中的“三可”原则。

3) 基于本文碳计量方法得到的动态碳排放因子可引导用户开展低碳需求响应,丰富了用户侧减碳手段。

最后,本文从电力市场对碳计量的影响、适应电网管理结构的碳计量方法和多能源系统的碳计量问题等方面对未来电力能源系统碳计量领域研究中的关键问题进行了讨论和展望。

该成果在研究过程中得到清华大学自主科研计划(2021Z11GHX012)的支持,特此感谢!

参考文献

- [1] Energy & Climate Intelligence Unit. Net zero emission race 2022 scorecard [EB/OL]. (2022-02-05) [2022-02-05]. <https://eci.net/netzerotracker>.
- [2] 中国电力企业联合会. 中国电力行业年度发展报告 2021[R]. 2021. China Electricity Council. Annual development report of China power industry 2021[R]. 2021.
- [3] 涂正革. 中国的碳减排路径与战略选择:基于八大行业部门碳排放量的指数分解分析[J]. 中国社会科学, 2012, 3: 78-94. TU Zhengge. Strategic measures to reduce China's carbon emissions: based on an index decomposition analysis of carbon emissions in eight industries[J]. Social Science in China, 2012, 3: 78-94.
- [4] 姜克隽, 昂莉, 侯艳丽. “可测量、可报告、可核实”方法的框架及在中国的适用性分析[J]. 气候变化研究进展, 2010, 6(3): 216-221. JIANG Kexie, ANG Li, HOU Yanli. Framing issues for MRV of mitigation actions and its possibility in China[J]. Advances in Climate Change Research, 2010, 6(3): 216-221.
- [5] 中共中央国务院. 计量发展规划(2021—2035年)的通知 [EB/OL]. (2021-12-31) [2022-02-05]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2022-01/28/content_5670947.htm. The State council of the Central Committee of the Communist of China. Notice of metrology development plan (2021—2035) [EB/OL]. (2021-12-31) [2022-02-05]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2022-01/28/content_5670947.htm.
- [6] 市场监管总局, 国家发展改革委员会, 工业和信息化部, 自然资源部, 生态环境部, 住房城乡建设部, 交通运输部, 中国气象局, 国家林草局. 关于印发建立健全碳达峰碳中和标准计量体系实

- 施方案的通知[EB/OL].(2022-11-15)[2022-11-15].http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-11/01/content_5723071.htm.
- General Administration of Market Regulation, National Development and Reform Commission, Ministry of Industry and Information Technology, Ministry of Natural Resources, Ministry of Ecology and Environment, Ministry of Housing and Urban-Rural Development, Ministry of Transport, China Meteorological Administration, National Forestry and Grassland Bureau. Notice on the issuance of the implementation plan for the establishment of carbon peak and carbon neutral standard measurement system [EB/OL]. (2022-11-15) [2022-11-15]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-11/01/content_5723071.htm.
- [7] 师华定,齐永青,梁海超,等.电力行业温室气体排放核算方法体系研究[J].气候变化研究进展,2010,6(1):40-46.
SHI Huading, QI Yongqing, LIANG Haichao, et al. The research of greenhouse gas accounting system for power industry [J]. Advances in Climate Change Research, 2010, 6(1):40-46.
- [8] 刘明达,蒙古军,刘碧寒.国内外碳排放核算方法研究进展[J].热带地理,2014,34(2):248-258.
LIU Mingda, MENG Jijun, LIU Bihan. Progress in the studies of carbon emission estimation[J]. Tropical Geography, 2014, 34(2): 248-258.
- [9] 全国碳排放管理标准化技术委员会.温室气体排放核算与报告要求 第1部分:发电企业:GB/T 32151.1—2015[S].2015.
National Carbon Emission Management Standardization Technical Committee. requirements of greenhouse gas emissions accounting and reporting Part 1: power generation company: GB/T 32151.1—2015[S]. 2015.
- [10] 夏德建,任玉珑,史乐峰.中国煤电能源链的生命周期碳排放系数计量[J].统计研究,2010,27(8):82-89.
XIA Dejian, REN Yulong, SHI Lefeng. Measurement of life-cycle carbon equivalent emissions of coal-energy chain [J]. Statistical Research, 2010, 27(8): 82-89.
- [11] 戢时雨,高超,陈彬,等.基于生命周期的风电场碳排放核算[J].生态学报,2016,36(4):915-923.
JI Shiyu, GAO Chao, CHEN Bin, et al. Carbon emission accounting for wind farm based on life cycle assessment [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(4): 915-923.
- [12] HERTWICH E G, GIBON T, BOUMAN E A, et al. Integrated life-cycle assessment of electricity-supply scenarios confirms global environmental benefit of low-carbon technologies [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2015, 112(20): 6277-6282.
- [13] CHAU C, LEUNG T, NG W. A review on life cycle assessment, life cycle energy assessment and life cycle carbon emissions assessment on buildings [J]. Applied Energy, 2015, 143: 395-413.
- [14] IPCC. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [M]. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006.
- [15] 李鹏,吴文昊,郭伟.连续监测方法在全国碳市场应用的挑战与对策[J].环境经济研究,2021,6(1):77-92.
LI Peng, WU Wenhao, GUO Wei. The challenges and recommendations of application of the measurement-based monitoring methodology in national carbon market [J]. Environmental Economic Research, 2021, 6(1): 77-92
- [16] 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,2021,45(7):38-43.
ZHOU Tianrui, KANG Chongqing, XU Qian Yao, et al. On-line verification system for relay protection settings based on dynamic short-circuit current calculation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(7): 38-43.
- [17] 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):49-54.
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): 49-54.
- [18] 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.
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.
- [19] 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[EB/OL].(2022-11-15)[2022-11-15].<https://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/wsqtzk/202012/W020201229610354442145.pdf>.
Ministry of Ecology and Environment. 2019 China regional grid CO₂ baseline emission factor BM calculation instructions [EB/OL]. [2022-11-15]. <https://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/wsqtzk/202012/W020201229610354442145.pdf>.
- [20] IPCC Working Group III. Mitigation of climate change [EB/OL]. [2022-11-15]. <https://www.ipcc.ch/working-group/wg3/>.
- [21] 李姚旺,张宁,杜尔顺,等.基于碳排放流的电力系统低碳需求响应机制研究及效益分析[J].中国电机工程学报,2022,42(8):2830-2841.
LI Yaowang, ZHANG Ning, DU Ershun, et al. Mechanism study and benefit analysis on power system low carbon demand response based on carbon emission flow [J]. Proceedings of CESS, 2022, 42(8): 2830-2841.

张宁(1985—),男,通信作者,博士,长聘副教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统规划、多能源系统、高比例可再生能源电力系统、低碳电力技术。E-mail: ningzhang@tsinghua.edu.cn

李姚旺(1993—),男,博士,助理研究员,主要研究方向: 电力系统规划设计、电力系统仿真、能源电力经济。
低碳电力技术、云储能技术、压缩空气储能。E-mail: yaowang_li@126.com E-mail: xshjh@126.com

黄俊辉(1965—),男,研究员级高级工程师,主要研究方

(编辑 杨松迎)

Carbon Measurement Method and Carbon Meter System for Whole Chain of Power System

ZHANG Ning¹, LI Yaowang², HUANG Junhui³, LI Yaohong³, DU Ershun²,
LI Mingxuan², LIU Yuliang², KANG Chongqing²

1. National Key Laboratory of New Power System Operation and Control (Tsinghua University), Beijing 100084, China;
2. Tsinghua Sichuan Energy Internet Research Institute, Chengdu 610213, China;
3. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

Abstract: The power industry is the largest industry for coal consumption and carbon emission in China. Real-time, accurate, and comprehensive measurement of electric power carbon emission is the basis and premise for estimating the potential of electric power carbon emission reduction, incentivizing power consumers to reduce carbon emission, and supporting the data foundation of carbon markets. Therefore, based on the “three abilities” principle of “measurability, reportability, and verifiability” proposed by the United Nations Framework Convention on Climate Change, a carbon measurement method for the whole chain of the power system is proposed. The framework is based on the theory of the carbon emission flow for the power system and realizes the “minute-level” real-time carbon measurement and “consumer-level” precise carbon measurement on the generation-transmission-load sides. On this basis, the carbon measurement system for the whole chain of the power system is designed. The basic concept and implementation form of the power carbon meter system are introduced in detail. The simulation verification is carried out based on the actual system operation data and load data of Changzhou City, Jiangsu Province, China. The simulation results verify the effectiveness of the proposed method. Finally, the key issues that need to be further studied in the field of carbon measurement of power system are prospected.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 52130702).

Key words: carbon measurement; carbon accounting; carbon emission flow; carbon meter system; electric carbon platform; carbon emission factor

