

面向减排贡献的电碳解耦分摊离散分析理论及计算方法

周欢¹, 黄婷², 卢世祥³, 何光宇¹, 周意诚⁴, 严正¹

(1. 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室(上海交通大学), 上海市 闵行区 200240; 2. 国网上海市电力公司浦东供电公司, 上海市 浦东新区 200122; 3. 南方电网数字电网研究院有限公司, 广东省 广州市 510700; 4. 早稻田大学科学与工程学院, 日本 东京 169-8050)

Discrete Analysis Theory and Calculation Method of Electricity-carbon Decoupling Sharing by Contribution to Carbon Emission Reduction

ZHOU Huan¹, HUANG Ting², LU Shixiang³, HE Guangyu¹, ZHOU Yicheng⁴, YAN Zheng¹

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education (Shanghai Jiao Tong University), Minhang District, Shanghai 200240, China; 2. State Grid Pudong Electric Power Supply Company, Pudong New Area, Shanghai 200122, China; 3. Digital Grid Research Institute of China Southern Power Grid, Guangzhou 510700, Guangdong Province, China; 4. Faculty of Science and Engineering, Waseda University, Tokyo 169-8050, Japan)

ABSTRACT: Clarifying the rights and responsibilities of carbon emissions and establishing a theory and method system for carbon flow distribution in net-zero carbon evolution serve as the foundation for low-carbon transformation and development in the power system. Existing methods of carbon flow analysis focus on the share of load carbon emission responsibility. This paper proposes a discrete analysis theory and calculation method of carbon flow distribution in power system with spatiotemporal coupling from the perspective of the consumption contribution of load to renewable energy. First, aiming at improving the consistency of time series characteristics between power supply and load, and consumption of renewable energy, the carbon emission is extended from continuous allocation of single time section to comprehensive evaluation of multiple continuous time sections, and a discrete analysis theory is established to analyze carbon flow distribution with multi-period, process-oriented and real-time evaluation. Then, considering the time-space coupling characteristics of power supply and load in the period, a carbon emission evaluation scheme considering the contribution of renewable energy consumption is proposed. Finally, a discrete calculation model of carbon emission flow distribution is established based on the evaluation scheme, and a decoupled calculation method of power flow and carbon emission flow is

proposed to achieve efficient traceability of carbon emissions and fast solution of branch/node carbon flow rate. Case study shows that the discrete distribution method proposed can achieve carbon balance of the whole and all links, which proves the feasibility of the theory. In addition, comparing with the existing methods, load nodes can achieve emission reduction without reducing the total power consumption by adjusting the load time sequence, which is conducive to forcing the consumption of renewable energy through carbon constraints. As a result, rationality and superiority of the proposed theory are verified.

KEY WORDS: net-zero carbon evolution; contribution to carbon emission reduction; electricity carbon decoupling sharing; discrete analysis; renewable energy consumption

摘要:厘清碳排放权责, 建立面向零碳演化的碳排放分析理论和方法体系是电力系统低碳化转型的基础。已有碳排放分析方法侧重于对负荷碳责任的分摊, 该文从负荷对新能源消纳贡献角度出发, 提出1种面向减排贡献的电碳解耦分摊离散分析理论及计算方法。首先, 以提升源荷时序特征的一致性, 促进新能源消纳为目标, 将碳排放从单时间断面连续分摊扩展到多连续时间断面综合评价, 建立适用于多时段、面向过程、实时评价的电碳分摊离散分析基础理论; 其次, 考虑时段内电源和负荷的时空耦合特性, 提出计及新能源消纳贡献的碳排放责任评价机制; 最后, 基于评价机制建立电碳离散分摊模型, 提出潮流与碳流解耦计算方法, 实现对碳排放的高效溯源、支路/节点电碳流率的快速求解。算例结果

表明,所提出的离散分析理论和计算方法能够实现整体和各环节的碳平衡,具备可行性。此外,与已有分摊方法对比,负荷节点可以在不降低用电总量的条件下,通过用电时序的优化实现减排,促进新能源消纳,验证了方法的合理性和优越性。

关键词: 零碳演化; 减排贡献; 电碳解耦分摊; 离散分析; 新能源消纳

0 引言

能源行业碳排放占中国二氧化碳排放总量的88%^[1],是我国碳中和目标的主战场。作为化石燃料消耗的主要部分,电力系统碳排放占能源系统总排放的约37%,其低碳化转型具有十分重要的意义,也是一项长期艰巨的任务^[2]。

厘清碳排放的权责,激活各环节的减排潜力,促进新能源消纳是“碳视角”下电力系统亟待突破的关键问题^[3]。作为二次能源,电能产生的二氧化碳几乎全部来源于发电环节,在电能传输、使用过程中并不产生直接的碳排放^[4]。然而,由于新能源的随机性和间歇性与用户稳定可控利用需求之间存在一定的矛盾,而电力系统又具有严格的电力电量实时平衡要求,导致用户侧不同的用电行为将产生不同的电力碳排放量^[5]。因此,电力用户应成为碳排放的主要责任人,如何将用户用电行为纳入到碳排放的分摊体系,建立全新的电力系统碳排放分摊理论和计算方法,是解决上述问题的关键^[6]。

目前世界各国政府都在加强对负荷侧碳排放的统计,提出了包括居民、商业楼宇、交通等领域的碳排放计量标准和统计原则^[7]。此类方法本质上是基于碳排放因子的宏观统计法,在精细化程度和电-碳生成机制分析等方面存在不足^[8]。近年来,以清华大学康重庆教授团队为代表的学者提出将碳排放放在电力系统中的流动形式进行实体化,并定义为依附于有功潮流存在的虚拟网络流,建立了电力系统碳流理论和计算方法^[9]。该方法将虚拟碳流与电力潮流相结合,为电网中碳流分布特性和机理分析研究奠定基础^[10]。碳流理论为电力系统的低碳化转型提供了全新的视角,引发了一系列专家学者的跟进。例如,文献[11]建立了电力系统碳排放流的理念和理论框架,并给出了节点碳势、支路碳流率等概念的定义和计算方法;文献[12]提出电力系统排放的二氧化碳应该由消费者而非生产者承担,并考虑网络特征,建立了有功潮流和碳流之间的计算

模型。文献[13]提出一种发电侧和负荷侧共同碳责任分摊方法,认为发电机组和负荷都应该承担节能减排责任,并采用Aumann-Shapley法进行了分摊求解。文献[14]提出考虑历史排放赤字的电力初始碳排放权公理化平均分配方法,根据谁引起、谁负责的原则,建立了历史排放赤字在各机组间的分摊模型,并对分摊模型进行了公理化处理。

现有的碳流分析理论将“潮流”与“碳流”进行耦合计算,在揭示电-碳耦合机理,提升用户对低碳行为的感知能力等方面取得了重大突破。该方法的特点是在溯源过程中采用比例共享原则^[15],结果侧重于对负荷“碳排放责任”的分摊。考虑到电力系统脱碳的关键在于突破高比例新能源消纳的瓶颈,而影响新能源消纳的关键因素之一是用户的用电习惯与时序规律。因此,也可以直接面向减排贡献建立电碳分摊理论,将负荷对新能源消纳贡献纳入碳排放权责分配体系^[16]。由于分析负荷对新能源消纳贡献需要考虑多个连续时间断面的特征,因而有必要从多个连续时间断面来分析电力系统碳排放分布的形态特征^[17]。同时,多时间断面的碳排放分摊方法将突破比例共享分摊的原则,建立一种基于贡献度的差异化评价机制。

针对上述考量,本文在已有研究的基础上,提出面向减排贡献的电碳解耦分摊离散分析理论及计算方法。主要创新点在于以下几个方面。

1) 建立了电碳解耦分摊的离散分析理论,将碳排放责任从单时段分摊拓展到多连续时间断面的评价。

2) 提出计及新能源消纳贡献的碳排放评价机制,考虑电源与负荷的消纳关系建立空间耦合,基于时序特性量化负荷对新能源的消纳贡献,使用户可以向电网输出调节能力,而非降低负荷的方式实现减排。

3) 构建了碳排放离散分摊模型及其计算方法,不设碳排放因子,将潮流与碳流解耦计算,实现多连续时段碳排放的快速求解和高效溯源,提升了方法的实时性和可用性。

1 电碳解耦分摊离散分析理论

1.1 离散分析的基本思路

1) 多时段: 基于时序特征量化负荷减排贡献。

我国拥有全球最大的电网规模,要实现“3060”碳中和的目标,未来数十年将面临巨大的减排压

力。电力系统碳中和的关键在于突破高比例新能源消纳的瓶颈，而影响新能源消纳的关键因素之一是用户的用电习惯与时序规律^[18]。从此角度出发，可以将碳排放权责分摊建立在“一种低碳友好的用电习惯或时序规律”基础上。为实现基于时序特征的碳排放权责分配体系，需要从已有单时间断面的分析扩展到多连续时段的分析，并建立新的分析理论、指标和计算方法。

2) 面向过程：量化负荷运行(或连续调节)过程的减排贡献。

目前，世界各国普遍采用碳排放因子法，我国电力系统也提出了区域碳排放因子，对区域用户每度电产生的碳排放进行粗略的计算，该方法直接面向结果，便于事后统计与国家宏观层面的统计，但无法反应电力系统碳流分布的时变特征。动态碳排放因子能够很好地解决上述问题，通过时变的碳排放因子让用户实时感知到不同时段用电行为产生的碳排放的差异^[19]，达到优化负荷的用电时序的目的。事实上，动态碳排放因子在原有方法基础上融入了时序特征，并通过“动态责任分摊”和来激发负荷的需求响应潜力，提升源荷时序规律的一致性。

从“以终为始”的思维模式出发，考虑到碳排放责任分摊的目的是为了促进用户减排，而减排的关键是要提升负荷对新能源的消纳贡献。因此，可以从“减排贡献”视角出发建立碳排放权责评价机制。在此评价机制下，不再通过碳排放因子建立“潮流”与“碳流”的耦合，而是基于时序特征建立新能源消纳贡献(脱碳目标)和负荷时序灵活性(脱碳方法)之间耦合。如此，电网脱碳不单要注重负荷时序特征对电力系统脱碳所产生的结果，同时也需注重时序特征变化对新能源消纳的过程。在此过程中，负荷可通过向电网动态输出灵活性而非降低负荷总量来实现减排。即使用电总量相同，不够低碳友好的用电时序将评价得到更多的碳排放，因为其时序特征不利于新能源消纳，系统需要调动更多的灵活性资源来平抑供需不匹配问题。相反，低碳友好的用电时序将评价得到较少的碳排放，表明此类时序特征越多，将越有利于新能源消纳，促进电力系统脱碳。

3) 实时评价：通过网荷协同控制促进高比例间歇性新能源实时消纳。

以风电、光伏为代表的新能源具有显著的随机

性、间歇性特点，在减排过程中，高比例新能源接入将对电网调度带来巨大挑战。例如华东地区，分布式光伏已初具规模，气象条件如云层的变化会造成负荷的剧烈波动，在灵活性不足条件下，电网难以实现大规模间歇性新能源的接入和消纳。因此，长时间尺度的评价无法有效解决新能源消纳问题，减排过程需考虑新能源的出力特性、实时评价，采用事前预测、精细化引导、精准负荷控制来解决高比例新能源实时消纳问题。例如，近年来需求侧以电动汽车、温控负荷为代表的可调负荷大规模发展，灵活性和互动能力大大提升，可基于物联网技术对负荷状态进行精准调节(如空调温度设定、电动汽车充电时序等)，实现对新能源出力的在线跟踪，从而有效突破间歇性新能源实时消纳的瓶颈问题。

1.2 离散分析的特点

1) 多时间断面的周期性计算。

离散分析方法中无传统意义上的碳排放因子，计算网络中的碳排放分布，需先采用物联网技术对网络各节点进行连续观测，基于离散采样信号(采样频率如 1min)对机组和负荷的时序特征进行周期性(如 15min)提取。在单个时段内，综合考虑所有电源和负荷的时序特征(时)和网络约束(空)，将供给侧产生的碳排放量按照一定的粒度和规则“路由”至需求侧。实现网络中碳排放分摊的周期性计算如图 1 所示。

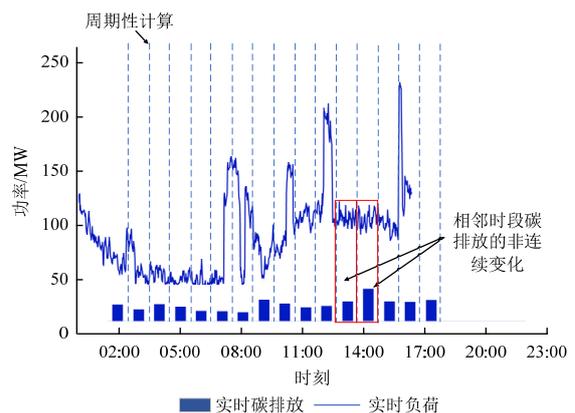


图 1 电碳分摊周期性计算示意图

Fig. 1 Schematic diagram of periodic calculation for electricity carbon sharing

2) 相邻时段支路/节点碳排放的非连续变化。

由于负荷评价得到的碳排放量仅取决于周期内的时序特征，与相邻周期无关。因此，时段内各支路/节点的碳排放量将独立计算，相邻时段支路/节点碳排放量的变化无暂态过程，全网碳排放分布

与演化趋势由所有节点相互作用决定。

3) “潮流”与“碳流”解耦计算。

当计算方法从单时间断面拓宽到多连续时段时,系统将不存在碳排放因子。在周期内,多用电不一定会产生多的碳排放,少用电也不一定能够减少碳排放,负荷节点评价得到的碳排放量由时段内负荷时序的低碳友好性程度决定。

1.3 前提假设

1) 离散分析时段 T 内(如 15min)电网各支路的潮流方向不变,不考虑 $N-1$,不存在有源负荷倒送。

2) 假设时段 T 中最小监测步长为 Δt ,电源碳排放和电量的计量满足 Δt 频率要求。

3) 忽略网络损耗。

4) 假设电网中电源节点数量为 G_M ,负荷节点数量为 L_N ,存在既消纳新能源又消纳火电机组的负荷节点。

5) 研究针对电网运行过程的碳排放分摊,不考虑设备寿命周期产生的碳排放,即新能源电站的碳排放为 0。

1.4 关键指标及计算方法

1.4.1 能碳密度

能碳密度(carbon density of energy, CDE)是指单位电能中等效 CO_2 的含量,单位为 $\text{kg CO}_2/(\text{kW}\cdot\text{h})$,用字母 ρ 表示,计算方法为

$$\rho = m_{\text{CO}_2} / E \quad (1)$$

式中: E 为电量,表示发电机的发电量时 $E > 0$,表示负荷的用电量时 $E < 0$; m_{CO_2} 为 E 中等效 CO_2 的质量,单位为 kg 或 t ,该概念同样可以扩充到综合能源系统,用于表征单位能量中 CO_2 含量。

能碳密度和碳排放因子具有相同的单位,在评价结果时,2者一致,均表示单位电量中等效 CO_2 含量^[20]。但2者也有明显区别,首先能碳密度和碳排放因子的线性特征不同,碳排放因子中负荷的碳排放与用电量为线性关系,此时,用“因子”或“系数”更合适。能碳密度取值由耦合关系和负荷特征决定,单位电量的碳排放与电量、负荷时序特征不存在明显的线性关系。其次,碳排放因子是针对单一时段的系数,只需要逐时段累加即可得到最终结果。能碳密度为考虑多连续时段综合评价的结果,计算过程需要考虑时空耦合,并且是在评价时段结束之后结算。

1.4.2 电碳帧

电碳帧(electricity carbon frame, ECF)为电网碳

排放评价过程中最小计算元组,ECF 主要包括 5 个部分:时间标识 T 、发电机组编号 G 、评价所得电量 E 、能碳密度 ρ 、负荷节点编号 L , ECF 用字母 μ 表示,如式(2)所示, μ 为 1 个信息单元,在时段 T 结束后进行求解,即

$$\mu = (T, G, E, \rho, L) \quad (2)$$

基于式(2)可知,火电机组的发电过程可视为以时间间隔 T 为周期、不断向电网注入 μ 的运行过程,每个时段 T 发送 μ 的数量与该时段消纳其发电量的负荷节点数相关,下面进行举例说明。

假如机组 A 在时段 T 内发电量为 E ,共产生 $\text{CO}_2 \beta \text{kg}$,发电量被负荷 X 和 Y 消纳,最终评价所得比例为 $x:y$,则电碳帧为 $[A, x/(x+y), \beta/E, X]$ 、 $[A, y/(x+y), \beta/E, Y]$ 。需要注意的是,能碳密度 ρ 是通过量测得到的客观值,而电量最终评价比例 $x:y$ 是待求变量。

1.4.3 电碳吞吐量

电碳吞吐量(throughput of electricity carbon, TEC)用于描述单位时间内通过某个节点或支路的电碳帧的数量,用 ν 表示,单位为帧/min。对于发电机组,其向电网注入的 TEC 可以表示为 $\nu_G = |\mu|/T$, $|\mu|$ 表示注入电碳帧数量,对于支路 ν_b 和负荷节点 ν_L 的 TEC,计算方法如式(3)所示:

$$\begin{cases} \nu_b = \sum_{G_b=1}^{N_{G_b}} |\mu|_{G_b} / T \\ \nu_L = \sum_{G_L=1}^{N_{G_L}} |\mu|_{G_L} / T \end{cases} \quad (3)$$

式中: G_b 为流入支路 b 的发电机编号; N_{G_b} 为流入该支路的机组数目; $|\mu|_{G_b}$ 为该机组 μ 数量; G_L 为流入负荷节点 L 的支路编号; N_{G_L} 为流入该节点的支路总数; $|\mu|_{G_L}$ 为该支路的 μ 数量。

TEC 反映了碳排在源-网-荷各环节之间的耦合关系,即哪些节点负荷对火电机组的耦合度高。并且,在已知源荷节点耦合关系下,支路 TEC 决定了电碳帧的“路由”路径,实现对碳排放的溯源。此外,由定义可知,TEC 的上限值为节点/支路的带宽。

1.4.4 电碳流率

通过电碳吞吐量指标,可以得到支路/节点的全部电碳帧信息,基于电碳帧来提取能碳密度和电量等关键数据可以计算单位时间中通过支路和节点的等效 CO_2 排放量,定义为电碳流率(electricity

carbon flow rate, ECFR), 单位为 kg CO₂/s 或 t CO₂/h。用字母 τ 表示。对于发电机组, 其向电网注入的 ECFR 可以表示为 $\tau_G = |E_{G_i} \cdot \rho_{G_i}| / T$, 对于支路 τ_b 和负荷节点 τ_L 的 ECFR, 计算方法如式(4)所示:

$$\begin{cases} \tau_b = \sum_{G_b=1}^{N_{G_b}} |E_{G_b} \cdot \rho_{G_b}| / T \\ \tau_L = \sum_{G_L=1}^{N_{G_L}} |E_{G_L} \cdot \rho_{G_L}| / T \end{cases} \quad (4)$$

式中: E_{G_b} 和 E_{G_L} 分别为电碳帧中的电量; ρ_{G_b} 和 ρ_{G_L} 分别为电碳帧中的能量密度。

与 TEC 不同的是, ECFR 用于描述流入某条支路或某个节点的碳排放强度, 即单位时间碳排放的消耗量。TEC 是 ECFR 的计算基础, 只有在确定

ECF 和 TEC 的基础上, 才能定量计算支路和节点的 ECFR。

上述各指标的意义如表 1 所示, 各指标在评价机制中的应用如图 2 所示。

表 1 离散分析理论中各指标的意义

Table 1 Significance of each index in discrete analysis theory

指标	符号	单位	意义
能碳密度	ρ	kg CO ₂ /(kW·h)	单位能量中等效 CO ₂ 含量, 即“能-碳耦合度”或“能中有多少碳”
电碳帧	μ	—	碳排放虚拟实体的信息化表征
电碳吞吐量	ν	f/min	表征碳排放分摊的空间分布特征, 用于溯源
电碳流率	τ	kg CO ₂ /s	表征碳排放分摊的时域分布特征

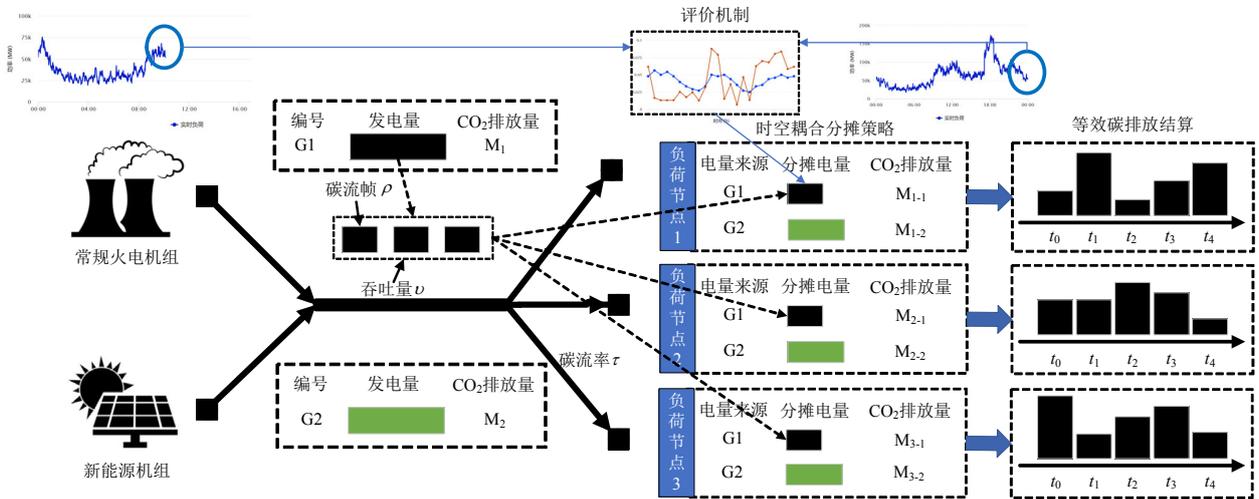


图 2 电碳解耦分摊离散分析示意图

Fig. 2 Discrete analysis diagram of electricity carbon decoupling sharing

2 计及新能源消纳贡献的碳排放评价机制

在不考虑线路约束条件下, 负荷与新能源时序规律一致有利于新能源消纳, 此时, 电网所需调度的灵活性资源少, 新能源消纳边际成本低, 该时序特征对系统而言为“低碳”。相反, 若负荷与新能源规律相反, 电网需付出额外的调节代价消纳新能源, 时序不匹配实际上将调节的责任进行转移, 由电网兜底, 该时序特征对系统而言为“高碳”。因此, 同时率可以用来评价负荷对新能源消纳的贡献^[21]。但是, 仅通过时序特征来确定负荷中新能源电量占比不够合理, 并且, 计算每个负荷对系统中所有新能源消纳的贡献也无必要, 评价机制需基于潮流方向考虑电源和负荷之间的消纳关系, 即空间耦合。

2.1 空间耦合关系表征

在潮流分布已知的条件下, 可将电网视为有向

无环图, 并且拓扑图可以自动生成^[22]。其中图的顶点为电源和负荷节点, 图的边为网架结构, 表征各电源和负荷节点之间的线路连接关系, 顶点之间的方向与电网潮流的方向相同。基于潮流方向, 以电源为起点, 依次遍历图的广度和深度, 即可得到电源与负荷之间的耦合关系。例如附图 A1 中, 电源 G5 的遍历路径为 8->7->4->3, 8->7->4->9->14, 8->7->9->14, 则该时段, 负荷 3,4,7,8,9,14 节点与 G5 存在空间耦合。当潮流方向发生改变时, 电源和负荷节点之间的耦合关系也将发生变化, 因此, 不同时段节点之间的空间耦合是 1 种基于潮流方向的动态耦合, 用 0 和 1 表示, 如式(5)所示:

$$\gamma_{G_q, L_p} = \begin{cases} 0, f_r(E_{G_q, L_p}) = 0 \\ 1, f_r(E_{G_q, L_p}) > 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: γ_{G_q, L_p} 为电源 G_q 与负荷 L_p 之间的耦合关系;

$f_r(E_{G_q, L_p})$ 为负荷 L_p 消纳电源 G_q 的电量。在时段 T 内, 对于任意给定的潮流分布, 所有电源和负荷的消纳关系可以采用矩阵 Γ 表示, 如式(6)所示。

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \gamma_{G_1, L_1} & \gamma_{G_1, L_2} & \cdots & \gamma_{G_1, L_N} \\ \gamma_{G_2, L_1} & \gamma_{G_2, L_2} & \cdots & \gamma_{G_2, L_N} \\ \vdots & & \gamma_{G_q, L_p} & \\ \gamma_{G_M, L_1} & & \cdots & \gamma_{G_M, L_N} \end{bmatrix} \quad (6)$$

2.2 基于时序特征的新能源消纳贡献评价方法

基于电源和负荷的动态耦合关系计算各负荷节点对新能源的消纳贡献, 假设时段 T 内新能源机组和负荷节点的观测时序分别为 ω_R 和 ω_L , 如式(7)所示:

$$\begin{cases} \omega_R = \{E_R(t_1), E_R(t_2), \dots, E_R(t_{N_\omega})\} \\ \omega_L = \{E_L(t_1), E_L(t_2), \dots, E_L(t_{N_\omega})\} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $E_R(t_1)$ 和 $E_L(t_1)$ 分别代表第1个 Δt 步长新能源机组的发电量和负荷的用电量; N_ω 为时段 T 内的采样点数。假设时段 T 内 ω_R 和 ω_L 的总累计电量分别为 E_R 和 E_L , 则负荷 L 与新能源 R 的同时率 ξ_{L-R} 为^[23], 如式(8)所示:

$$\begin{cases} r(t) = \omega_R / E_R \\ l(t) = \omega_L / E_L \\ d = \sqrt{[l'(t) - r'(t)]^2} \\ \xi_{L-R} = e^{-\lambda d} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $r(t)$ 和 $l(t)$ 分别为新能源和负荷电量时序的归一化值曲线; d 为2个曲线一阶微分的欧式距离; λ 为相似度系数。 ξ 取值范围为 $[0, 1]$ 。当负荷曲线与新能源曲线相似度降低时, d 取值增大, ξ 减小, 最小可以无穷接近于0, 当负荷电量为0时, $\xi=0$; 反之, 当负荷曲线与新能源出力曲线接近时, d 减小, ξ 增大, 直到完全一致时, $d=0$, $\xi=1$ 。

考虑电力系统网络结构, 每个负荷节点可能同时消纳了多个机组的电量, 每组对应关系都存在一个 ξ 。其中一部分 ξ 表示负荷与新能源电站的同时率, 一部分 ξ 表示负荷节点与火电机组的同时率。为对负荷节点新能源消纳贡献进行整体综合评价, 定义负荷节点绿电指数 Ω_L , 表征耦合关系下负荷节点 L 对网络中新能源消纳的贡献, 如式(9)所示:

$$\Omega_L = \sum_{G_R=1}^{N_{G_R}} |E_{G_R} \xi_{G_R, L}| / [E_{G_L}^{\text{tot}}(T)] \quad (9)$$

式中: $\Omega_L \in [0, 1]$; N_{G_R} 为与负荷节点 L 耦合的新能源机组数量; $E_{G_L}^{\text{tot}}(T)$ 为与负荷节点 L 耦合的发电机

组总电量。

2.3 时空耦合下节点碳导矩阵

由定义可知, Ω_L 为负荷节点与耦合电源同时率的电量加权和, 即与负荷节点与网络中大容量新能源电站的同时率保持一致时, 绿电指数 Ω_L 较大。在时段 T 内, 若负荷节点对新能源消纳贡献大, 则其“抵抗”电碳帧的能力应越强, 所评价得到的火电机组的发电量应越少; 反之, 对于消纳火电机组电量较多的负荷, 其对电碳帧的“导通”度也越强。取 Ω_L 的倒数, 定义为节点碳导 Φ_L (nodal carbon admittance, NCA), 如式(10):

$$\begin{cases} \Phi_L = 1 / \Omega_L \\ \Phi_{G_q, L_p} = \Phi_{L_p} / \sum_{L_c=1}^{G_c} \Phi_{G_q, L_c} \end{cases} \quad (10)$$

式中: G_c 为与机组 G_q 存在耦合的负荷节点数; L_c 为其中第 c 个负荷节点已知负荷碳导, 可以求得任意负荷节点 L_p 对机组 G_c 的碳导率 Φ_{G_q, L_p} , 整个网络中所有节点的碳导属性可表征为节点碳导矩阵 Φ , 如式(11)所示:

$$\Phi = \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ \vdots \\ G_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_{G_1, L_1} & \Phi_{G_1, L_2} & \cdots & \Phi_{G_1, L_N} \\ \Phi_{G_2, L_1} & \Phi_{G_2, L_2} & & \Phi_{G_2, L_N} \\ \cdots & & \Phi_{G_q, L_p} & \cdots \\ \Phi_{G_M, L_1} & \Phi_{G_M, L_2} & & \Phi_{G_M, L_N} \end{bmatrix} \quad (11)$$

3 离散分摊模型及其计算方法

高效求解算法是离散分析理论落地实施的关键, 本节先建立离散分摊模型, 再考虑电网时空耦合特性, 推导出节点碳排放的通解形式。由于本文的分摊方法建立在时序特征基础上, 因此, 在潮流方向不变的情况下, 全网碳排放的分摊可根据已知的耦合关系直接计算, 在一定程度上可以提升碳排放的分摊效率, 满足海量用户常态化、在线分摊的需求。

3.1 离散分摊模型的目标

时段 T 内, 机组 G 产生的直接碳排放 Π_G 可以表示为

$$\begin{cases} \Pi_G = E_G \rho_G \\ \rho_G = \sum_{t_i=1}^{N_\omega} C(t_i) \pi_G / E_G(t_i) \end{cases} \quad (12)$$

式中: E_G 为机组 G 的发电量; ρ_G 为能碳密度; $C(t_i)$ 为采样点 t_i 对应的平均煤耗系数, $\text{kg CO}_2/(\text{kW}\cdot\text{h})$; π_G 为燃料对应的碳排放因子; $E_G(t_i)$ 为采样间隔的

累积发电量。

离散分摊的目标为将供给侧产生的直接碳排放对需求侧各负荷节点进行等效分摊。对于 1 个由 M 台机组和 N 个负荷节点构成的网络，其分摊目标如式(13)所示：

$$\boldsymbol{\Pi} = \begin{bmatrix} \Pi_{G_1} \\ \Pi_{G_2} \\ \vdots \\ \Pi_{G_M} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Pi_{L_1-G_1} & \Pi_{L_2-G_1} & \cdots & \Pi_{L_N-G_1} \\ \Pi_{L_1-G_2} & \Pi_{L_2-G_2} & \cdots & \Pi_{L_N-G_2} \\ \vdots & \vdots & \Pi_{L_p-G_q} & \vdots \\ \Pi_{L_1-G_M} & \Pi_{L_2-G_M} & \cdots & \Pi_{L_N-G_M} \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中： Π_{G_i} 为供给侧机组 G_i 在时段 T 产生的直接碳排放； $\Pi_{L_p-G_q}$ 为负荷节点 L_p 分摊的机组 G_q 的等效碳排放，其中新能源机组碳排放为 0。

3.2 约束条件

3.2.1 系统碳平衡约束

任意时段 T ，系统产生的直接碳排放与负荷分摊的等效间接碳排放相等，如式(14)所示：

$$\begin{cases} \sum_{G_q=1}^{G_M} \Pi_{G_q}(T) = \sum_{L_p=1}^{L_N} \Pi_{L_p}(T) \\ T = \{1, 2, \dots, N_T\} \end{cases} \quad (14)$$

式中 N_T 为总时段数。

3.2.2 机组碳平衡约束

任意时段 T ，系统中任意火电机组产生的直接碳排放与所有负荷节点分摊的该机组的等效碳排放相等，如式(15)所示：

$$\begin{cases} \Pi_{G_q}(T) = \sum_{L_p=1}^{L_N} \Pi_{L_p-G_q}(T) \\ p = \{1, 2, \dots, G_M\} \end{cases} \quad (15)$$

3.2.3 节点碳平衡约束

任意节点流入的碳排放与流出的碳排放平衡，即：

$$\begin{cases} \Pi_{L_p-n}(T) = \sum_{B_{in-n}=1}^{N_{in-n}} \Pi_{B_{in-n}}(T) - \sum_{B_{out-n}=1}^{N_{out-n}} \Pi_{B_{out-n}}(T) \\ n = \{1, 2, \dots, N_b\} \end{cases} \quad (16)$$

式中： N_b 为电网节点数； $\Pi_{B_{in-n}}(T)$ 和 $\Pi_{B_{out-n}}(T)$ 分别为 T 时段流入和流出节点 n 的支路碳排放； N_{in-n} 和 N_{out-n} 分别为流入和流出节点 n 的支路数。

3.3 离散分摊的求解方法

离散分摊的求解本质上需解决电量溯源的问题，即各负荷节点电量分摊耦合电源的电量比例。当突破比例共享原则假设后，电量溯源原则上有无

穷组可行解，但若给定节点碳导矩阵，其分摊的结果将具有唯一性，并为时空耦合下所有节点相互作用的结果。

假设 T 时段所有电源和负荷的电量如式(17)所示：

$$\begin{cases} L_E = [E_{L_1}, E_{L_2}, \dots, E_{L_N}] \\ G_E = [E_{G_1}, E_{G_2}, \dots, E_{G_M}] \end{cases} \quad (17)$$

式中： E_{L_p} 和 E_{G_q} 分别为第 p 个负荷节点和 q 个电源在时段 T 的总电量。若用分摊系数 $r_{L_p-G_q}$ 表示负荷节点 L_p 中分摊的机组 G_q 的电量占 L_p 总电量的比例，则全网分摊的系数矩阵可以表示为

$$\mathbf{R} = \begin{cases} r_{L_p-G_q} = E_{L_p-G_q} / E_{L_p} \\ \begin{bmatrix} r_{L_1-G_1} & r_{L_1-G_2} & \cdots & r_{L_1-G_M} \\ r_{L_2-G_1} & r_{L_2-G_2} & \cdots & r_{L_2-G_M} \\ \vdots & & r_{L_p-G_q} & \\ r_{L_N-G_1} & r_{L_N-G_2} & \cdots & r_{L_N-G_M} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (18)$$

式中： E_{L_p} 为时段 T 内，负荷节点 L_p 的总用电量； $E_{L_p-G_q}$ 为负荷节点 L_p 分摊到机组 G_q 的电量。

综合式(5)一式(11)，不难得出如下平衡方程：

$$\begin{cases} \mathbf{R}\mathbf{V}^T = \mathbf{V} \\ \frac{r_{L_1-G_k}}{\Phi_{G_k, L_1}} = \frac{r_{L_2-G_k}}{\Phi_{G_k, L_2}} = \dots = \theta_k, k \in \{1, 2, \dots, M\} \\ \mathbf{L}_E \mathbf{R} = \mathbf{G}_E^T \end{cases} \quad (19)$$

式中： \mathbf{V} 为值等于 1，维度为 M 的向量。上述 3 个平衡方程中，第 1 个方程的含义为负荷分摊系数和为 1，由式(18)对 $r_{L_p-G_q}$ 定义决定。第 2 个方程是碳导矩阵对分摊系数的作用，即碳导率越大，分摊的等效 CO_2 越多。第 3 个方程表示任意发电机组的发电量与所有与其耦合的负荷节点分摊的发电量相等。

综合式(19)的方程组，可以推导得到矩阵 \mathbf{R} 的通解如式(20)所示，推导过程见附录 B：

$$r_{L_p-G_q} = \frac{E_{G_q} \Phi_{L_p-G_q}}{E_{L_1} \Phi_{L_1-G_q} + E_{L_2} \Phi_{L_2-G_q} + \dots + E_{L_N} \Phi_{L_N-G_q}} \quad (20)$$

式(20)表明，在计算节点碳导矩阵后，可以对全网碳排放分摊系数进行直接求解。考虑离散分析理论下，电量的溯源通过电碳帧进行标识，此时，发电机组 G_q 传递至负荷节点 L_p 的电碳帧如式(21)所示：

$$\mu_{q-p} = (T, G_q, E_{L_p}, r_{L_p-G_q}, \Pi_{G_q}(T) / E_{G_q}, L_p) \quad (21)$$

由耦合关系可以得到 T 时段的节点电碳吞吐量, 再由吞吐量计算得到节点电碳流率为

$$\tau_{L_p} = \sum_{i \in M} E_{L_p} r_{L_p-G_q} \Pi_{G_q}(T) / E_{G_q} \quad (22)$$

3.4 计算流程

考虑电力系统碳排放分摊的常态化闭环计算, 设计算法流程如图3所示。

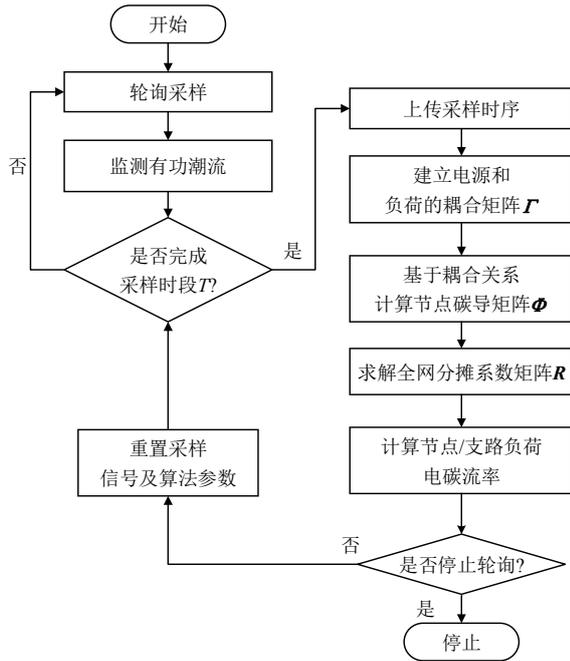


图3 电碳离散分配算法流程

Fig. 3 Flow chart of electricity carbon discrete allocation algorithm

4 算例分析

为验证本文所提方法的有效性, 选取 IEEE 14 节点系统进行算例分析。算例不考虑网络损耗, 潮流分布采用直流潮流法。时段 T 为 15min, 采样频率 3min, 相似度系数 $\lambda=3$, 系统中单位为 kW, 设定 G2 和 G5 为新能源机组, G1 为燃煤机组, 研究时段内排放系数为 $0.775\text{kg CO}_2/(\text{kW}\cdot\text{h})$, G3 和 G4 为燃气机组, 排放系数取 $0.3791\text{kg CO}_2/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。各机组出力和节点负荷见附表 A1, 时段 T 内系统平均潮流分布如附图 A1 中, 负荷节点与发电机组的耦合关系如附表 A2。

4.1 IEEE 14 节点算例分析

基于附表 A1 可以得到研究时段 T 内电源和负荷的时序关系, 通过式(7)–(11)可以计算得到节点碳导矩阵如表 2 所示。

从表 2 的碳导矩阵可以看出, 其中除电量为 0

表 2 研究时段 T 的节点碳导矩阵

节点	G1	G2	G3	G4	G5
1	—	—	—	—	—
2	16.16	2.99	—	—	—
3	4.09	19.76	13.82	4.71	57.59
4	4.76	1.61	—	3.26	4.52
5	32.34	5.89	—	27.37	—
6	—	—	—	22.13	—
7	—	—	—	—	—
8	—	—	—	—	—
9	30.51	5.6	—	—	1.83
10	21.93	4.08	—	18.92	1.32
11	—	—	—	34.14	—
12	—	—	—	30.56	—
13	—	—	—	19.79	—
14	22.07	4.08	—	18.75	1.33

的 1、7、8 节点之外, 共有 7 个节点消纳了 G2 的新能源电量, 5 个节点消纳了 G5 的新能源电量。其中负荷节点 2 和 4 与 G2 机组的相似度较高, 节点 9,10,14 与 G5 相似度较高, 表明节点将分摊到更多的绿色电量。

基于本文式(15)–(18)可以求解负荷节点对各电源电量的分摊系数, 由分摊系数得到分摊电量如表 3 所示。由各机组碳排放系数可知, 研究时段内, 3 台机组的电碳流率为 $980\text{kg CO}_2/\text{h}$, 14 个负荷节点的电量乘以对应的碳排放系数得到电碳流率同样为 $980\text{kg CO}_2/\text{h}$, 实现了碳排放的均衡分摊。其中机组 G1 的电碳流率为 $544.8\text{kg CO}_2/\text{h}$, 电量由负荷节点 2,3 等 7 个负荷节点分摊, 所得电碳流率之

表 3 负荷节点分摊各机组电量

节点	G1	G2	G3	G4	G5
1	0	0	0	0	0
2	173.46	36.54	0	0	0
3	183.3	176.72	469.243	3.572	107.159
4	208.68	96.822	0	120.323	44.181
5	3.28	17.52	0	59.2	0
6	0	0	0	120	0
7	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0
9	62.467	17.642	0	0	9.9
10	68.1	27	0	34.2	20.7
11	0	0	0	40	0
12	0	0	0	60	0
13	0	0	0	140	0
14	4.05	26.85	0	101.7	17.4

和也为 544.8kg CO₂/h。G3 注入碳流率为 177.9kg CO₂/h，由负荷节点 3 单独分摊，虽然负荷节点 3 还消纳了其他机组的电量，但其分摊的 G3 机组电量与 G3 发电量完全一致。G4 注入电碳流率为 257kg CO₂/h，电量由 3,4 等 9 个负荷节点分摊，所得电碳流率之和同样为 257kgCO₂/h。上述 3 个节点电碳流率相等说明机组分摊碳平衡。

通过表 3 给出了各负荷节点的分摊电量可以求解各节点的电碳流率，然后进一步求解得到各支路的电碳流率，结果如图 4 所示，其中红色的字体为

负荷节点电碳流率，蓝色字体为支路电碳流率。由图 4 可知，以负荷节点 2 为例，各支路流入的电碳流率为 403.4kg CO₂/h，新能源机组注入的电碳流率为 0，流出的电碳流率分别为 134.4, 139.7, 43.7, 85.6kg CO₂/h，4 者之和同样为 403.4kg CO₂/h。各负荷节点均实现了碳平衡。

综合上述 3 个平衡关系，可以验证本文所提方法的可行性。

4.2 与已有算法对比

基于本文所提方法与文献[15]的碳流分析方法进行对比，得到结果如图 5 所示。由于 G2 和 G5 为新能源机组，因此只有 G1、G3、G4 这三台机组参与碳排放分配。节点 3 的负荷高于 G3 发电量，因此在网络约束下，2 种方法的分摊比例相同，均为 177.88kg CO₂/h。在相同耦合关系下，负荷节点 2、3、4、5、9、10、14 节点既消纳了 G2 新能源电量又消纳了 G1 火电机组的电量，虽然潮流分布及变化规律一致，但是由于负荷时序与机组出力的相似度差异，导致负荷节点的碳排放分配结果存在明显差异。例如负荷节点 4 中，若按照比例共享原则，其消耗的燃煤机组 G1 的电量为 267kW·h，燃气机组 G3 电量 0kW·h，G4 电量为 63.21kW·h，分摊的碳流率对应为 207.5 kg CO₂/h。但是，考虑其负荷与节点 G2 和 G5 的相似度高，节点碳通仅为 1.61 和 4.52，根据本文的计算方法将分摊较多的新能源电量，电碳流率降低到 161.73 kgCO₂/h，在用电总量相同的条件下，相对传统方法碳排放降低约 22.06%。

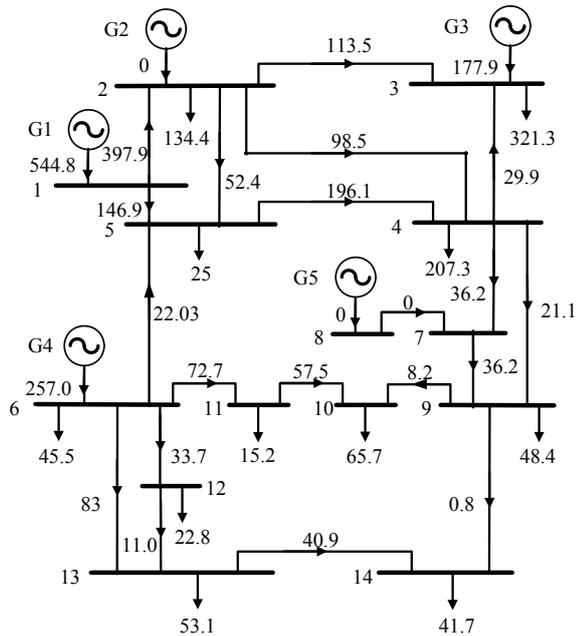
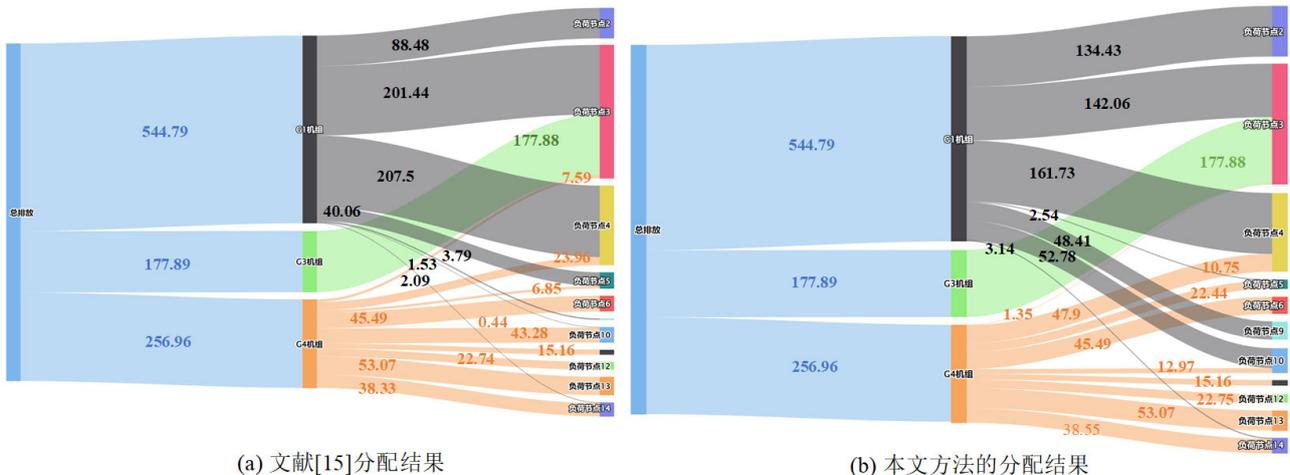


图 4 IEEE-14 节点电碳流率离散分配结果
Fig. 4 Discrete allocation results of electricity carbon flow rate at IEEE 14 nodes



(a) 文献[15]分配结果 (b) 本文方法的分配结果
图 5 与已有单时段碳排放分摊方法的对比
Fig. 5 Comparison with existing single period carbon emission sharing methods

4.3 低碳效益分析

为进一步验证分摊方法对促进新能源消纳、推

动电力系统减排的优势。假设新能源电量存在弃风弃光且时序规律不变，常规机组调节能力约束不

变。同时,考虑负荷接入位置对新能源消纳的影响,假设低碳友好型用户均匀分布且互动能力逐步提升。在此基础上,验证负荷在不同互动能力下对新能源消纳和系统减排的影响,结果如表4所示。

表4 低碳友好型用户对新能源消纳程度的影响
Table 4 Impact of low-carbon friendly users on consumption of renewable energy

负荷调节能力/%	新能源占比/%	系统电碳流率/(kg CO ₂ /h)
0	24.49	980
3	27.18	886
5	31.54	749
8	39.06	612
10	51.39	379

结合表4的数据,可以得到本文所提方法主要优势包括以下几个方面。

1) 将负荷低碳效益评估从局部视角扩展到整体视角。目前,需求侧的商业楼宇、工业企业广泛采用计划式、以避免电能浪费为主的减排模式。在评价用户的减排效益时,需要先预测基线负荷^[24],然后根据调节曲线与基线负荷的偏差量来计算减排效益。该方法是将用户与自己过去的平均水平进行对比,产生的低碳效益是针对个体计算的,对电网整体是否有益存在不确定性。本文提出的方法中,用户的低碳效益来源于当前时段与系统中新能源的时序规律相似度,无需计算基线负荷,同一负荷节点下所有的用户拥有理想的标准负荷准线,通过电网调度及源网荷协同,用户调整负荷时序逼近新能源出力规律的过程将对新能源消纳产生直接、确定性的效益,实现了用户减排与电网低碳的统一。

2) 激发需求侧的互动能力,提升电网的灵活性。本文所提方法是对用户用电产生间接碳排放的直接、在线计算。从长远来看,随着碳达峰拐点的到来,碳总量约束逐年降低趋势下,用户可以在不降低用电总量的条件下,通过动态调整用电习惯来降低排放,该方法能够满足用户发展的内在需求,逐步激发用户的减排动力和互动能力。并且,随着物联网技术的发展与广泛应用^[25],负荷调节的自动化程度将大大提升,需求响应也将逐步常态化,从间歇性开环响应到常态化闭环调度^[26-27],而当低碳友好型用户的规模和自动化程度提升后,其时序调节能力将为电网提供丰富的灵活性。

3) 促进新能源消纳,推动电网低碳化转型。如表4可知,随着负荷在时域范围调节能力的提升,新能源消纳的比例逐步增加,系统总体电碳流率显

著减少。在初始状态下,系统中最大的新能源消纳潜力约为24.49%,整体电碳流率高达980 kgCO₂/h。若负荷拥有3%的调节能力,新能源占比能够提升2.69%,全网电碳流率下降到886 kgCO₂/h,提升约9.59%。当负荷调节能力提升到10%,新能源占比能够达到26.9%,电碳流率下降到379 kgCO₂/h,提升约61.3%。上述结果说明本文提出的方法能够减少弃风弃光,在整体层面促进电力系统低碳化转型。

5 结论

1) 建立的电力系统电碳解耦分摊离散分析理论,定义了能碳密度、电碳帧、电碳吞吐量、电碳流率等指标,算例验证了方法的可行性。

2) 提出的计及新能源消纳贡献的评价机制,将机组出力和负荷消纳关系、时序特征纳入到碳排放分摊体系之中,算例验证该分配方法能够有效促进新能源消纳,推动电力系统低碳转型。

3) 构建了电碳离散分摊模型与计算方法,实现了潮流与碳流的解耦计算,以及碳排放的高效溯源,为新能源的实时消纳和碳排放分摊的在线监测奠定基础。

未来将进一步在如下方面进行完善和优化:

①潮流不确定性下的分析方法;②碳视角下新能源电站的选址定容;③离散分析方法下的需求响应机制;④考虑海量用户的碳排放计量与在线监测技术。

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] 国际电力网. 《舒印彪院士:构建以新能源为主的新型电力系统》[R/OL]. 2021. <https://power.in-en.com/html/power-2403205.shtml>.
Power. in-en. com. Academician Shu Yinbiao: Building a new type power system based on renewable energy [R/OL]. 2021. <https://power.in-en.com/html/power-2403205.shtml>(in Chinese).
- [3] 李响,牛赛. 双碳目标下源-网-荷多层评价体系研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(S1): 178-184.
LI Xiang, NIU Sai. Study on multi-layer evaluation

- system of source-grid-load under carbon-neutral goal[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(S1): 178-184(in Chinese).
- [4] 黄雨涵, 丁涛, 李雨婷, 等. 碳中和背景下能源低碳化技术综述及对新型电力系统发展的启示[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(S1): 28-51.
HUANG Yuhuan, DING Tao, LI Yuting, et al. Decarbonization technologies and inspirations for the development of novel power systems in the context of carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(S1): 28-51(in Chinese).
- [5] 李晖, 刘栋, 姚丹阳. 面向碳达峰碳中和目标的我国电力系统发展研判[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(18): 6245-6258.
LI Hui, LIU Dong, YAO Danyang. Analysis and reflection on the development of power system towards the goal of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18): 6245-6258(in Chinese).
- [6] 李政, 陈思源, 董文娟, 等. 碳约束条件下电力行业低碳转型路径研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12): 3987-4001.
LI Zheng, CHEN Siyuan, DONG Wenjuan, et al. Low carbon transition pathway of power sector under carbon emission constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 3987-4001(in Chinese).
- [7] IPCC. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[M]. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006.
- [8] 刘明达, 蒙吉军, 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(in Chinese).
- [9] 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.
- [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] 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).
- [12] 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).
- [13] 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).
- [14] 梅天华, 汤优敏, 甘德强. 考虑历史排放赤字的电力初始碳排放权公理化公平分配方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(3): 52-58.
MEI Tianhua, TANG Youmin, GAN Deqiang. Axiomatic equity allocation method of initial emission allowances in power systems considering historical emission deficits[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(3): 52-58(in Chinese).
- [15] 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).
- [16] TAO Yuechuan, QIU Jing, LAI Shuying, et al. Carbon-oriented electricity network planning and transformation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(2): 1034-1048.
- [17] WANG Yunqi, QIU Jing, TAO Yuechuan, et al. Carbon-oriented operational planning in coupled electricity and emission trading markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(4): 3145-3157.
- [18] 范帅, 危怡涵, 何光宇, 等. 面向新型电力系统的需求响应机制探讨[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(7): 1-12.
FAN Shuai, WEI Yihan, HE Guangyu, et al. Discussion on demand response mechanism for new power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(7): 1-12(in Chinese).
- [19] 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 the CSEE, 2022, 42(8): 2830-2841(in Chinese).

[20] 中华人民共和国生态环境部. 《关于做好2022年企业温室气体排放报告管理相关重点工作的通知》解读[R/OL]. https://www.mee.gov.cn/zcwj/zcjd/202203/t20220315_971493.shtml. Ministry of Ecological Environment of the People's Republic of China. Notice on key work related to the management of enterprise greenhouse gas emission report in 2022[R/OL]. https://www.mee.gov.cn/zcwj/zcjd/202203/t20220315_971493.shtml(in Chinese).

[21] FAN Shuai, HE Guangyu, ZHOU Xinyang, et al. Online optimization for networked distributed energy resources with time-coupling constraints[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(1): 251-267.

[22] 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).

[23] 范帅, 郑琨琪, 王芬, 等. 基于负荷准线的大规模需求响应[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(15): 19-27. FAN Shuai, JIA Kunqi, WANG Fen, et al. Large-scale demand response based on customer directrix load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(15): 19-27(in Chinese).

[24] FAN Shuai, XIAO Jucheng, LI Zuyi, et al. Characterization and trading of energy level and energy shift considering virtual power plant[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2022, 10(6): 1784-1789.

[25] ZHOU Huan, FAN Shuai, WU Qing, et al. Stimulus-response control strategy based on autonomous decentralized system theory for exploitation of flexibility by virtual power plant[J]. Applied Energy, 2021, 285: 116424.

[26] 周欢, 王芬, 李志勇, 等. 虚拟电厂自趋优负荷跟踪控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(24): 8334-8349. ZHOU Huan, WANG Fen, LI Zhiyong, et al. Load tracking control strategy for virtual power plant via self-approaching optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(24): 8334-8349(in Chinese).

[27] 范帅, 何光宇, 郑湘明, 等. 基于在线分布式优化的虚拟电厂自趋优运行方法研究[J/OL]. 中国电机工程学报, 2022. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20220519.1833.041.html>.

FAN Shuai, HE Guangyu, ZHENG Xiangming, et al. Research on online distributed optimization-based self-approaching optimization operation method of virtual power plant[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2022. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20220519.1833.041.html>(in Chinese).

附录A IEEE-14节点离散分摊求解中间结果

表A1 机组和负荷的电量时序

Table A1 Power Sequence of load and power unit

算法	编号	1	2	3	4	5
负荷	1	0	0	0	0	0
	2	40.57	40.52	37.91	43.78	47.22
	3	175.53	170.47	206.55	196.14	191.3
	4	102.07	99.79	89.29	93	85.86
	5	17.31	15.51	15.78	16.4	15
	6	29.63	20.91	25.5	22.49	21.46
	7	0	0	0	0	0
	8	0	0	0	0	0
	9	18.2	16.64	17.83	17.79	19.55
	10	27.5	29.93	33.81	27.41	32.35
	11	7.33	7.71	9.02	7.31	8.63
	12	10.9	13.11	12.56	11.03	12.4
	13	26.8	27.3	30.19	29.53	26.18
	14	27.36	30.78	31.11	29.94	30.81
电源	G1	100.95	118.97	182.09	138.72	162.22
	G2	98.78	69.7	84.99	74.98	71.55
	G3	110.88	92.51	74.58	94.54	96.74
	G4	135.92	151.92	122.81	150.03	117.13
	G5	36.67	38.57	45.08	36.54	43.13

表A2 负荷节点与机组的耦合关系

Table A2 Consumption relationship between load and generator

节点	G1	G2	G3	G4	G5
1	0	0	0	0	0
2	1	1	0	0	0
3	1	1	1	1	1
4	1	1	0	1	1
5	1	1	0	1	0
6	0	0	0	1	0
7	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0
9	1	1	0	0	1
10	1	1	0	1	1
11	0	0	0	1	0
12	0	0	0	1	0
13	0	0	0	1	0
14	1	1	0	1	1

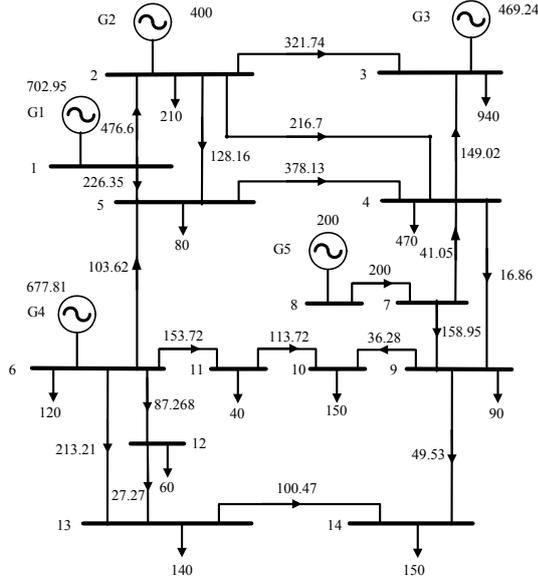


图 A1 IEEE-14 节点 15min 平均潮流
Fig. A1 Average power flow within 15min of IEEE-14 node system

附录 B 离散分摊模型求解步骤

模型求解过程：由式(19)可知：

$$\begin{cases} \mathbf{R}\mathbf{V}^T = \mathbf{V} \\ \frac{r_{G_k-L_1}}{\Phi_{G_k,L_1}} = \frac{r_{G_k-L_2}}{\Phi_{G_k,L_2}} = \dots = \theta_k, k \in 1, 2, \dots, M \\ \mathbf{L}_E \mathbf{R} = \mathbf{G}_E^T \end{cases} \quad (\text{A1})$$

由第 1 个方程 $\mathbf{R}\mathbf{V}^T = \mathbf{V}$ ，可得：

$$\begin{bmatrix} r_{L_1-G_1} & r_{L_1-G_2} & \dots & r_{L_1-G_M} \\ r_{L_2-G_1} & r_{L_2-G_2} & \dots & r_{L_2-G_M} \\ \vdots & & & \\ r_{L_N-G_1} & r_{L_N-G_2} & \dots & r_{L_N-G_M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A2})$$

由第 3 个方程 $\mathbf{L}_E \mathbf{R} = \mathbf{G}_E^T$ 可得：

$$\begin{bmatrix} E_{L_1} & E_{L_2} & \dots & E_{L_N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{L_1-G_1} & r_{L_1-G_2} & \dots & r_{L_1-G_M} \\ r_{L_2-G_1} & r_{L_2-G_2} & \dots & r_{L_2-G_M} \\ \vdots & & & \\ r_{L_N-G_1} & r_{L_N-G_2} & \dots & r_{L_N-G_M} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{G_1} \\ E_{G_2} \\ \vdots \\ E_{G_M} \end{bmatrix} \quad (\text{A3})$$

由上述矩阵可以得到负荷节点与电源的电量分配关系，其中负荷 L_1 和电源 G_1 的关系为

$$E_{L_1} r_{L_1-G_1} \theta_1 + E_{L_2} r_{L_2-G_1} \theta_1 + \dots + E_{L_N} r_{L_N-G_1} \theta_1 = E_{G_1} \quad (\text{A4})$$

考虑式(19)第 2 个方程节点碳导因素，代入可得：

$$E_{L_1} \Phi_{G_1,L_1} \theta_1 + E_{L_2} \Phi_{G_1,L_2} \theta_1 + \dots + E_{L_N} \Phi_{G_1,L_N} \theta_1 = E_{G_1} \quad (\text{A5})$$

求解 θ_1 为

$$\theta_1 = \frac{E_{G_1}}{E_{L_1} \Phi_{G_1,L_1} + E_{L_2} \Phi_{G_1,L_2} + \dots + E_{L_N} \Phi_{G_1,L_N}} \quad (\text{A6})$$

联合式(19)第 2 个方程，可以求得负荷 L_1 对电源 G_1 的分摊系数为

$$r_{L_1-G_1} = \frac{E_{G_1} \Phi_{G_1,L_1}}{E_{L_1} \Phi_{G_1,L_1} + E_{L_2} \Phi_{G_1,L_2} + \dots + E_{L_N} \Phi_{G_1,L_N}} \quad (\text{A6})$$

同理，对于负荷 L_p 和电源 G_q ，可得：

$$r_{L_p-G_q} = \frac{E_{G_q} \Phi_{L_p-G_q}}{E_{L_1} \Phi_{L_1-G_q} + E_{L_2} \Phi_{L_2-G_q} + \dots + E_{L_N} \Phi_{L_N-G_q}} \quad (\text{A7})$$

该式即为方程的通解，即式(20)。



周欢

收稿日期：2022-06-23。

作者简介：

周欢(1988)，男，博士，助理研究员，主要研究方向为网荷协同控制、虚拟电厂、低碳电力技术等，shenarder@sju.edu.cn；

何光宇(1972)，男，博士，教授，博士生导师，主要研究方向为智能电网、电力系统状态估计、智能用电网络、虚拟电厂等，hhhxjj@163.com。

(责任编辑 乔宝榆)