

复杂电力系统网络的碳排放流追踪研究*

马磊¹, 卢浩^{1,2,3†}, 李雅洁⁴

(1. 新疆大学 智能科学与技术学院, 新疆 乌鲁木齐 830017; 2. 新疆大学 电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830017; 3. 新疆大学 西北能源碳中和教育部工程研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830017; 4. 国网新疆电力有限公司信息通信公司, 新疆 乌鲁木齐 830018)

摘要: 现代电力系统中多数电厂采用电碳因子估计二氧化碳排放量。针对电碳因子在多节点电力系统网络中追踪碳流时, 电力系统网络节点数升高导致网络中功率流向复杂, 使用传统稀疏矩阵将难以追踪碳流的问题, 提出了一种网络节点重构方法。通过改变网络节点顺序使整个网络功率的流向与节点序号呈正相关, 使其成为单一流向的电力网络, 解决了传统稀疏矩阵因阶数升高导致的难以追踪线路碳流的问题。进一步考虑传输线路损耗对节点碳势与碳流密度的影响。以IEEE 14、IEEE 118无损节点系统与IEEE 30有损节点系统分别验证了该碳流追踪模型的准确性与快速性。最后, 通过传统风光火储园区模型验证了精准的电碳因子能够有效降低系统运行的成本与碳排放。

关键词: 电碳因子; 节点碳势; 碳流密度; 线损; 复杂网络; 网络重构

DOI: 10.13568/j.cnki.651094.651316.2024.07.02.0001

中图分类号: N32 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7675(2025)02-0186-016

引文格式: 马磊, 卢浩, 李雅洁. 复杂电力系统网络的碳排放流追踪研究[J]. 新疆大学学报(自然科学版中英文), 2025, 42(2): 186-201.

英文引文格式: MA Lei, LU Hao, LI Yajie. Carbon emission flow tracking study for complex power system networks[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English), 2025, 42(2): 186-201.

Carbon Emission Flow Tracking Study for Complex Power System Networks

MA Lei¹, LU Hao^{1,2,3}, LI Yajie⁴

(1. School of Intelligent Science and Technology, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830017, China; 2. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830017, China; 3. Northwest Energy and Carbon Neutral Research Center of the Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830017, China; 4. Information and Communication Company of State Grid Xinjiang Electric Power, Urumqi Xinjiang 830018, China)

Abstract: Most power plants in modern power systems use electric carbon factors to estimate carbon dioxide emissions. For the electric carbon factor to track the carbon flow in the multi-node power system networks, the elevated number of nodes in the power system network leads to the complexity of the power flow direction in the network, and it will be difficult to track the carbon flow using the traditional sparse matrix. A network node reconfiguration method is proposed to make the flow direction of power in the whole network positively correlated with the node order number by changing the order of network nodes to make it a single flow direction power network. The problem that it is difficult to track the line carbon flow with the elevated order of the traditional sparse matrix is solved. The effect of transmission line losses on the node carbon potential and carbon flow density is further considered. The accuracy and speed of this carbon flow tracking model are verified with IEEE 14, IEEE 118 lossless node system and IEEE 30 lossy node system, respectively. At last, the traditional wind-solar-thermal-storage park model was used to verify that precise electricity-carbon factors can effectively reduce the operating costs and carbon emissions of the system.

Key words: electric carbon factor; node carbon potential; carbon current density; line loss; complex network; network reconstruction

* 收稿日期: 2024-07-02

基金项目: 新疆维吾尔自治区重大科技专项“燃煤锅炉变负荷运行智能控制技术研究”(2023A01005-1); 国家自然科学基金地区项目“基于超疏水表面微结构优化的光伏组件自清洁机理与性能调控研究”(52266017); 国家社会科学基金重大项目“碳中和目标驱动下多能互补体系的协同机理与实现路径研究”(21&ZD133)。

作者简介: 马磊(1999—), 男, 硕士生, 从事碳核算及综合能源系统的研究, E-mail: 107552201756@stu.xju.edu.cn.

† 通讯作者: 卢浩(1989—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事综合能源与流体的研究, E-mail: luhao@xju.edu.cn.

0 引言

二氧化碳的排放量是经济和人口发展的一个重要标志,也是实现“碳达峰”和“碳中和”的重要数字指标。我国火电行业所排放的二氧化碳占比超过40%,要实现“双碳”目标,统计各个行业的二氧化碳排放量是首要任务。受客观条件和行业数据壁垒的限制,大部分电厂的二氧化碳排放量难以直接测量,但可以通过发电量对二氧化碳的排放量进行粗略估计。网侧发电量与源侧的燃煤消耗量,都可以作为原始数据进行二氧化碳排放量的计算。电力系统网络中的碳排放因子对用户侧行为产生的碳排放计算有着重要的意义。并且随着电网智能化、数字化的加快与碳交易市场的建设与运行,电网中碳流和碳势的计算作为预测碳排量的重要指标,对碳交易市场的建设与后期交易有着重要的参考价值^[1]。本文在网侧引入电碳因子,通过网侧发电量对二氧化碳排放量进行计算,由于电力传输具有极强的时效性,因此可以借助电碳因子计算出电能实时的含碳量,从而制定实时碳价,进而通过实时碳价对柔性负荷在时间尺度上进行调控,降低清洁能源浪费的同时减少电力行业二氧化碳的排放量。

对电力系统碳排放强度的分析,不仅可以更好地了解减排效率及其带来的经济效益,而且可以帮助调整能源使用计划,对于实现碳减排目标具有重要意义。Wang等^[2]采用差分法探讨了能权交易策略对碳排放量的影响。在碳排放交易市场中,电力用户除了关心电力费用外,还会关注其碳排放量所带来的费用。因此,将二氧化碳排放量转换为碳价,并以此对用户侧的用电行为进行调度,具有重要的应用价值。在此方面,Zhang等^[3]基于动态碳排放因子,构建了一种新的电力公司与用户间的互动控制机制,最大限度地降低了耗电的峰谷差。碳排放因子在一定程度上也可发挥宏观调控作用。此外,Wang^[4]和Shi^[5]等通过分析2001年至2021年260个城市的碳排放数据,探讨了碳排放的空间关联演变特征及其驱动因素。结果表明,经济发展、产业结构和技术创新等方面的差距扩大是推动碳排放联系形成的关键。在碳排放的趋势预测方面,Yang等^[6]基于数据驱动的规则提出了一种新的碳排放趋势预测模型。Lian等^[7]使用2000年至2021年中国30个省份的数据,通过格兰杰因果检验法验证了碳排放强度与其他因素之间的因果关系。针对碳排放的控制,Ma等^[8]提出了基于激励机制的双层综合需求响应方法,利用多能源时变电碳因子来降低碳排放成本,并构建了一个多能源时变电碳因子模型。Liu等^[9]探讨了2006年至2018年碳排放交易系统对中国长江中游城市群碳排放强度的影响。Gao等^[10]建立了一套碳责任分配机制模型,重点研究碳责任在工业部门和最终消费者之间的转移与分配,同时考虑碳排放和碳抵消。Gan等^[11]建立了环境部门模型、碳排放交易计划模型和碳排放权交易机制。基于能源与碳的耦合关系,Fan等^[12]研究了园区级综合能源系统中的碳嵌入式能源协调问题,并提出了能源碳定价策略,以平衡不同参与者的碳责任。由此可见,碳交易市场的建立能够有效宏观调控碳排放。因此,电力系统不同时空碳排放流的追踪溯源研究对碳交易市场及相关参与企业具有重要参考价值。Agrawal等^[13]采用生命周期法对印度某火电厂的二氧化碳排放量进行了计算。Heimbürger等^[14]则使用质量平衡法估算了城市甲烷燃烧后的二氧化碳排放量。Holland等^[15]分析了实时定价在短期内对效率、分配及环境的影响。电力市场的模拟表明,实时定价提高了效率,压缩了负荷与价格的波动,与理论一致。基于上述研究,本文进一步构建了一种碳排放责任转移至用户侧的分配传输模型,使用户侧能够参与碳减排活动。通过碳排放因子法计算电力系统的碳排放量,将电力系统的碳排放与用户用电量联系起来,使用户生产活动产生的碳排放更加直观可见。

康重庆^[16]和周天睿^[17]等提出了一种递推算算法来计算电力系统碳排放流。李业辉等^[18-19]提出了一种雅可比迭代法用于计算电网络中的碳流和碳势。龚昱等^[20]采用基于复功率潮流追踪的方法追踪线路碳流。汪超群等^[21-22]使用潮流功率矩阵的方法对线路碳流进行计算。Yang等^[23]从现代电力系统的角度出发,提出了一种非侵入式的工业企业实时碳排放核算方法。一方面,现有节点碳势的计算仍存在因网络节点顺序混乱而导致复杂网络中碳势难以计算的问题;另一方面,随着光伏、风电并网的比例增加,电碳因子在不同的时间和地区呈现不同的特点。因此本文在计算火电厂电碳因子的基础上类比电网中有功功率的流动,提出碳流密度(某条支路碳流率与其有功潮流的比值,表示支路传输单位电能所造成的等效于发电侧的碳排放量,单位为 $t\ CO_2/(MW\cdot h)$)和节点碳势(某一流入节点的支路碳流率之和与该节点流过功率之比,用来表示节点流过单位电能所产生的等效于发电侧的碳排放量,单位为 $t\ CO_2/(MW\cdot h)$)的概念。考虑到网损对参数的影响,改进了以电网实时有功功率传输数据为基础,能够实时计算出各个节点的节点碳势与线路碳流速率的算法模型^[24-25]。解决了传统稀疏矩阵由于节点顺序与潮流方向导致节点功率矩阵出现负值元素、难以计算线路碳流的问题。

1 碳流追踪模型

在电力系统网络中,不同的发电厂具有不同的电碳因子,与电厂关联的下层节点的节点碳势也会相应受到影响.因此,本文首先对影响火电厂电碳因子的几个关键因素进行列举与讨论.

电厂发电量与所排放二氧化碳之间的数值关系并不能直接得出,需要借助燃煤数据对两者之间的关系进行探究,由于燃煤在锅炉燃烧中存在燃烧不充分的情况,未参与燃烧的燃煤并不参与二氧化碳的释放.因此,计算电碳因子(ECF)时不仅需要考虑机组的传热效率,还要考虑机组类型对电碳因子的影响,经调研可知,1 kg碳完全燃烧释放32 825.56 kJ能量, ECF 及理想条件下的 ECF_{ideal} 如式(1)~(2)所示(单位:kg/(kW·h)):

$$ECF = \frac{M_{CO_2}}{Q}, \tag{1}$$

$$ECF_{ideal} = \frac{3\ 600}{32\ 825.56} \times \frac{44}{12} = 0.402\ 1. \tag{2}$$

实际工况中,不同机组有不同的发电效率,通过发电量计算二氧化碳排放量时需要用理想状态下的电碳因子除以机组的传热效率 ϵ_i 得到相应的电碳因子.机组的传热效率难以直观测得,只能通过总发电效率与氧化效率得到,如式(3)所示:

$$\epsilon_i = \frac{3\ 600Q}{32\ 825.56M_i\eta_iK_i}, \tag{3}$$

式中: ϵ_i 为第*i*个机组的传热效率, Q 为该机组某一时间段的发电量, M_i 为该机组该时间段所消耗的燃煤量, η_i 为所消耗燃煤的含碳量, K_i 为锅炉的氧化率.

1.1 无损网络碳流模型

电碳因子由系统有功功率与二氧化碳排放量计算得出,因此计算时需要类比电网络中有功功率的流动,对网络中的线路碳流密度和节点碳势建立模型进行计算.电力系统网络中的节点分为有源节点与无源节点两种,有源节点向网络中传输有功,而无源节点并不向网络中提供有功,只负责传输与消耗有功,在建立网络矩阵模型时需区别分析.对于如图1所示的四节点网络,其中:1、2节点为发电厂向电网络输送有功功率,为有源节点,3、4节点为无源节点,只从网络中吸收有功.1节点只向网络输送有功,并不吸收与消耗有功.

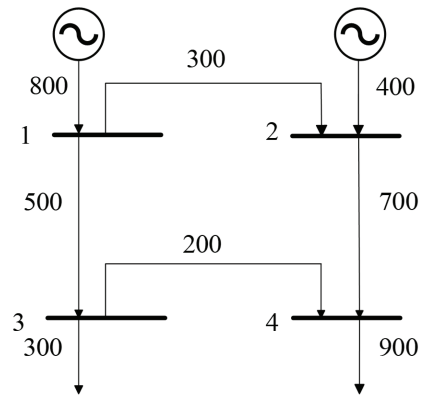


图 1 四节点网络有功电流分布

以某一时刻传输的有功为例,根据图2中的比例分配原则,节点在某一时刻的节点碳势计算可通过式(4)得出,即

$$e_i = \frac{\sum_{b \in I_i} P_b \rho_b + \sum_{s \in T_i} G_s e_s}{\sum_{b \in I_i} P_b + \sum_{s \in T_i} G_s}, \tag{4}$$

式中: I_i 、 T_i 分别表示向节点*i*注入有功能量的节点所有支路的集合, P_b 表示支路*b*的有功流入, ρ_b 表示支路*b*的支路碳流密度, G_s 表示连接节点*i*的发电机的有功功率, e_s 表示发电机组的电碳因子.

根据图1列写节点功率矩阵 P_{nn} ,其中主对角线不为零的节点为有源节点.列写节点功率矩阵时应首先列写有源节点,由于电网络潮流具有单向流动的特性,节点功率矩阵应为上三角或者下三角矩阵.本文以上三角矩阵为例,列写节点功率矩阵 P_{nn} ,如下所示:

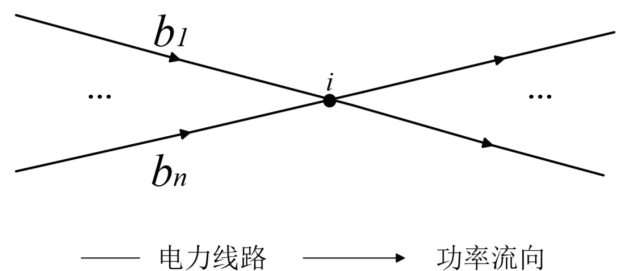


图 2 有功潮流流向示意图

$$P_{nn} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1i} & \cdots & p_{1n} \\ 0 & p_{22} & \cdots & p_{2i} & \cdots & p_{2n} \\ 0 & 0 & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & p_{ii} & \cdots & p_{in} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{nn} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中:主对角线元素 p_{ii} 为第 i 个节点所连接发电机注入 i 节点的有功, p_{ij} 为 i 节点对其相关联的节点 j 注入的有功.初始发电机的电碳因子向量为

$$ECF = [e_1 \ e_2 \ \cdots \ e_i \ \cdots \ e_n]. \quad (6)$$

每计算出第 i 个节点的节点碳势,都需对节点碳势向量第 i 个元素进行更新,在计算下层节点的电碳因子时,需要使用更新后的电碳因子向量,如下所示:

$$e'_i = \frac{\sum_{j=1}^n P_{ji} e_j}{\sum_{j=1}^n P_{ji}}, \quad (7)$$

$$ECF_i = [e'_1 \ e'_2 \ \cdots \ e'_{i-1} \ e'_i \ \cdots \ e_n], \quad (8)$$

式中: e_i 为未经过迭代的初始电碳因子, e'_i 为迭代后 i 节点的电碳因子.

以图1所示四节点网络为例,列写节点功率矩阵和初始电碳因子向量,并根据式(7)进行计算,可得

$$P = \begin{bmatrix} 800 & 300 & 500 & 0 \\ 0 & 400 & 0 & 700 \\ 0 & 0 & 0 & 200 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$ECF = [0.8 \ 0 \ 0 \ 0]. \quad (10)$$

由于首端节点影响着后续节点计算,因此在计算迭代时,需从首端开始.设节点1火电燃煤机组的电碳因子为0.8,节点2所连接的光伏电站的电碳因子为0.根据式(7)计算出四次迭代的节点碳势如表1所示,经过四次迭代最终的节点碳势如表2所示.

表1 四次迭代的节点碳势

迭代次数/节点	1	2	3	4
I	0.800 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
II	0.800 0	0.342 9	0.000 0	0.000 0
III	0.800 0	0.342 9	0.800 0	0.000 0
IV	0.800 0	0.342 9	0.800 0	0.444 4

表2 四节点网络的节点碳势

节点	1	2	3	4
节点碳势	0.800 0	0.342 9	0.800 0	0.444 4

在计算某个节点的节点碳势时,需判断其是否与更高一级的节点相关联,若与更高一级的节点相关联,则需要使用前一次迭代的新节点碳势进行计算.如在计算节点4的节点碳势时,根据等比例分布原则,节点2对应的值应为经过节点1迭代后得到的结果,即0.342 9.

但实际中多数网络的节点排序不会根据有功的流向顺序进行排序,导致网络的节点功率矩阵出现负值,从而得出错误的计算结果.因此需要在列写节点功率矩阵时对网络节点的顺序进行重构.若 p_{ij} 为负,则需要将 i 、 j 节点位置互换,此时其余与 i 、 j 节点相关联的节点也需要进行位置互换,即

$$p_{it} \rightleftharpoons p_{jt}, \quad (11)$$

$$p_{ti} \rightleftharpoons p_{tj}. \quad (12)$$

由于本文列写的节点功率矩阵为上三角矩阵,因此矩阵元素的行标需大于列标,当被交换元素的行标大于列标时应将其行标列标互换,由于改变了元素下标的顺序,需要将其二者取反,如式(13)、式(14)所示:

$$-p_{it} \rightleftharpoons -p_{tj} (t < j), \quad (13)$$

$$-p_{ti} \rightleftharpoons -p_{jt} (t < j). \quad (14)$$

在交换过程中可能会产生新的负值元素,需要重新检查整个节点功率矩阵中是否仍存在负值元素,若存在,则需重复上述操作直至整个矩阵不再包含负值元素,再对其进行迭代计算节点碳势.因此,在消除负值元素的过程中,每消除一个负值元素,则需对节点功率矩阵中的元素进行重新检查.消除网络功率矩阵中负值元素的过程本质上为重构网络节点的过程,最终当矩阵中不存在负值元素,对应于网络中有功功率的流动方向与节点序号方向一致.在消除矩阵中负值元素的过程中,系统网络一旦出现环流,则该环流线路上所包含的节点在计算潮流时将失去层级顺序,使该网络也不再具有单向流动的性质,导致环流所包含节点的潮流计算陷入不休止的循环.

短时间内网络中潮流的方向与网络拓扑不会发生改变,方向发生改变会体现在节点功率矩阵上,此时矩阵中元素若因为潮流方向的变化出现了负值元素,则需重复上述重构步骤,使该模型能够适应潮流的实时变化.

对上述理论进行验证.将图1节点顺序改变,得到

如图3所示的乱序四节点系统,使列写出的节点功率矩阵中出现负值元素,对应的节点功率矩阵和初始电碳因子向量如式(15)和式(16)所示:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 400 & 0 & 700 & -300 \\ 0 & 0 & 200 & -500 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 800 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

$$\mathbf{ECF} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.8 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

可以看出该矩阵中元素 a_{14} 和 a_{24} 为负值,对单个 a_{14} 来说需要将1节点和4节点的顺序互换,矩阵中其余与1、4节点相关的节点都需要互换位置,如 a_{13} 与 a_{43} 进行互换位置,但由于节点功率矩阵为上三角矩阵,主对角线下方元素全为零,所以需将 a_{13} 与 a_{34} 取反后互换位置.节点1、4互换后得节点功率矩阵与初始电碳因子向量为

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 800 & 500 & 0 & 300 \\ 0 & 0 & 200 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -700 \\ 0 & 0 & 0 & 400 \end{bmatrix}, \quad (17)$$

$$\mathbf{ECF} = \begin{bmatrix} 0.8 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (18)$$

式(17)、(19)中与 a_{14} 行列号相关联的元素需要交换位置,对 a_{14} 进行负值元素消除时,改变了原网络的节点顺序,同时也改变了其他元素的状态,相关元素的正负状态会随之改变,以该矩阵为例,此时元素 a'_{34} 为负, a'_{12} 为

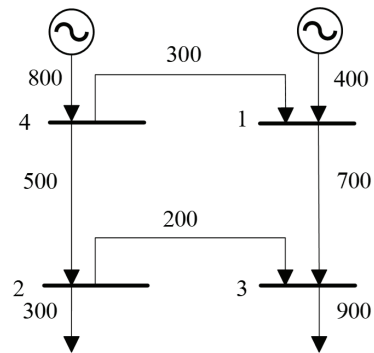


图3 乱序四节点系统

$$ECF = [0.875 \ 0.525 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0.520 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]. \quad (23)$$

根据上述方法模型,对P矩阵的负值元素使用算法进行消除,节点互换后的节点功率矩阵P'和初始向量ECF'为

$$P' = \begin{bmatrix} 120 & 77.95 & 42.05 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 40 & 27.41 & 35.85 & 32.98 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 36.92 & 0 & 24.95 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.22 & 0 & 0 & 12.42 & 11.33 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 60 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 19 & 0 & 0 & 0 & 7.43 & 0 & 7.71 & 17.61 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 20 & 20 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 32.42 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5.07 & 0 & 9.18 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3.93 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.61 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5.72 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (24)$$

$$ECF' = [0.875 \ 0.525 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0.520 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]. \quad (25)$$

经过14次迭代后计算出各个节点的节点碳势如图5与表4所示.可以看出,在消除节点功率矩阵中的负值元素时,需对节点3和5、节点10和11、节点7和8进行互换.由图4可以看出,排序前节点7只有清洁能源的注入,因此对应图5中节点7的节点碳势为0.在不考虑线路损耗的情况下,每条线路的线路碳流密度就等于其所连接上级节点的节点碳势.并且由图5可以看出,网络中清洁能源节点的存在一定程度上对下层节点的节点碳势起到了类似稀释的作用,因此,14节点中9个下层节点的节点碳势均未超过节点1的节点碳势.不同节点所处位置不同,所对应节点碳势各不相同.若考虑清洁能源与火电出力时间方面的差异,系统的节点碳势将具有时间动态性,且与有源节点出力占比具有相关性.

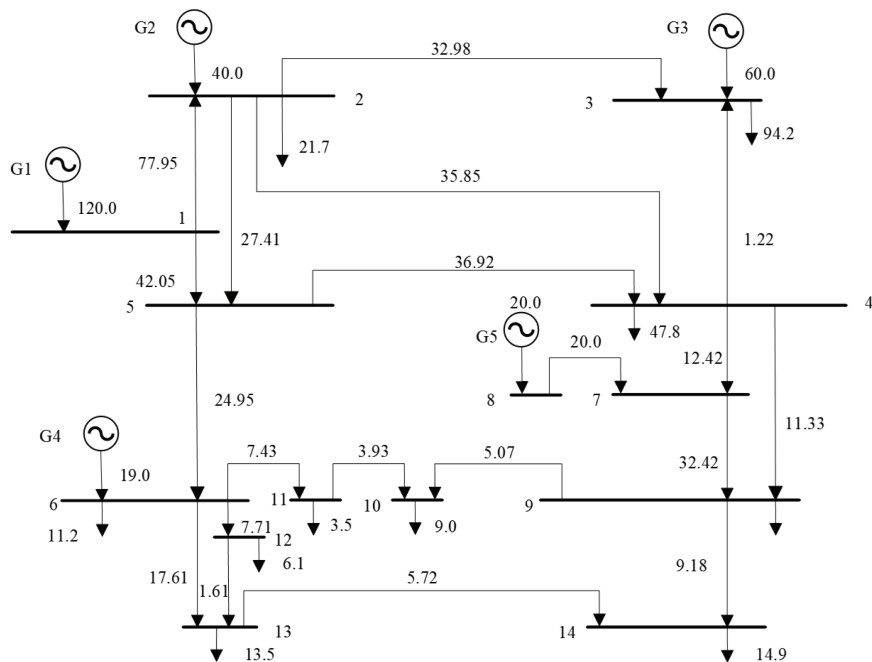


图 4 IEEE无损14节点网络

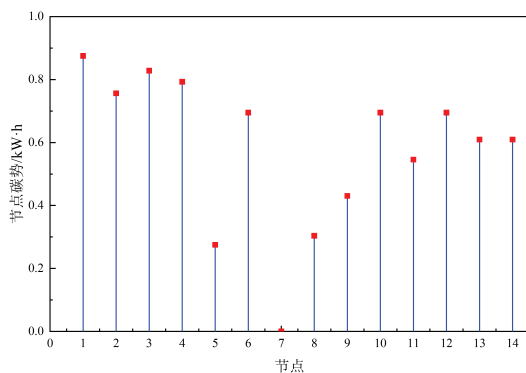


图 5 IEEE 14节点无损网络节点碳势

表 4 IEEE 14节点无损网络排序节点和原始节点

排序前	排序后	节点碳势	排序前	排序后	节点碳势
1	1	0.875 0	8	7	0.303 7
2	2	0.756 3	9	9	0.430 4
3	5	0.828 2	10	11	0.694 9
4	4	0.792 8	11	10	0.545 9
5	3	0.275 1	12	12	0.694 9
6	6	0.694 9	13	13	0.609 4
7	8	0.000 0	14	14	0.609 4

2.2 IEEE 30节点有损网络运算实例分析

分别采用有损与无损网络碳流模型计算如图6所示IEEE 30节点网络有损与无损工况下的节点碳势. 对照结果如图7所示, 排序算法计算后的节点顺序变化情况如表5所示, 对应到原节点的节点碳势如表6所示. 可以看出, 由于上级线路的碳损被分摊至下级节点, 除初始功率节点之外, 其余节点的节点碳势均有不同程度的升高, 但网络中总的碳流量不变, 只与网络所连接发电机组发出的有功功率和初始电碳因子有关.

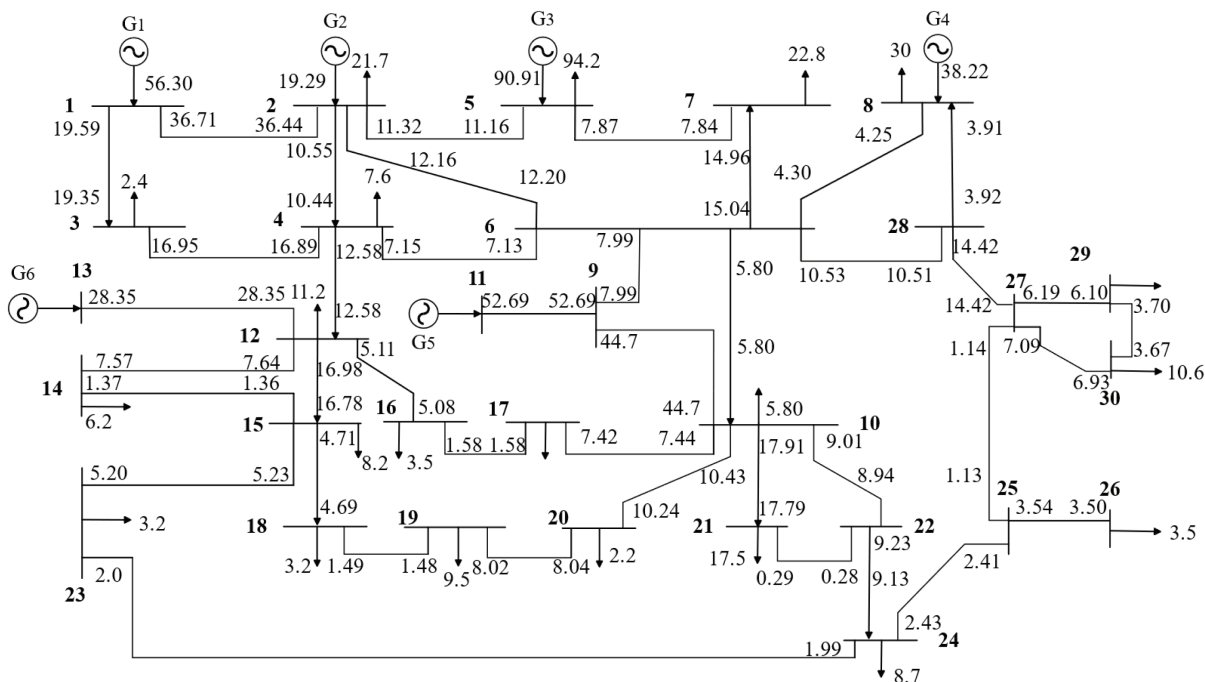


图 6 IEEE 30有损节点网络

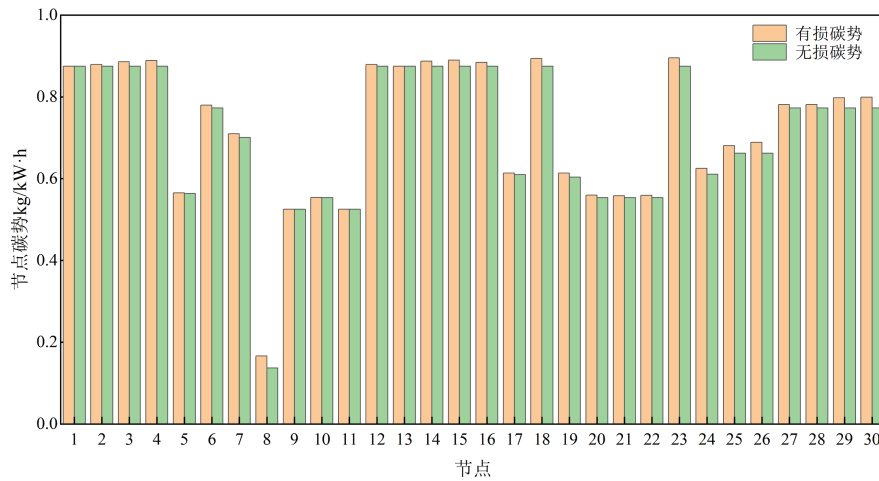


图 7 IEEE 30节点排序后有损与无损节点碳势对比

表 5 消除负值元素后节点顺序

排序后	排序前	排序后	排序前	排序后	排序前
1	1	28	11	21	21
2	2	12	12	22	22
3	3	13	13	23	23
4	4	14	14	24	24
5	5	15	15	27	25
11	6	16	16	25	26
9	7	17	17	26	27
6	8	18	18	8	28
7	9	20	19	30	29
10	10	19	20	29	30

表 6 IEEE 30节点有损与无损节点碳势对照

节点	无损	有损	节点	无损	有损
1	0.875 0	0.875 0	16	0.875 0	0.884 4
2	0.875 0	0.879 2	17	0.609 8	0.613 5
3	0.875 0	0.885 9	18	0.875 0	0.893 8
4	0.875 0	0.888 8	19	0.603 7	0.613 9
5	0.563 8	0.565 1	20	0.553 5	0.559 7
6	0.772 7	0.779 9	21	0.553 5	0.558 0
7	0.700 9	0.709 5	22	0.553 5	0.559 2
8	0.136 8	0.166 4	23	0.875 0	0.895 2
9	0.525 0	0.525 0	24	0.610 7	0.625 2
10	0.553 5	0.554 3	25	0.662 4	0.680 8
11	0.525 0	0.525 0	26	0.662 4	0.688 6
12	0.875 0	0.879 2	27	0.772 7	0.781 4
13	0.875 0	0.875 0	28	0.772 7	0.781 4
14	0.875 0	0.887 4	29	0.772 7	0.797 8
15	0.875 0	0.890 0	30	0.772 7	0.799 5

为探究有损网络与无损网络在计算节点碳势中的差值,对排序后的有损网络与无损网络的节点碳势做差,并对差值进行一次函数拟合,差值与拟合后函数曲线如图8所示.可以看出,节点8所连接发电厂的电碳因子为0,

但其余碳势不为0的节点向节点8注入了有功功率,因此节点8碳势经迭代后大于0,且排序后1~30节点的节点碳势之比存在一定的起伏,但有损网络与无损网络的差值总体呈上升趋势.由于每条线路产生的碳损失叠加到较低的节点与线路上,因此单向流动网络最末端的节点承担了与之相关的所有上层线路的碳流损失.

与有功潮流不同,发电所产生的二氧化碳并不在线路中产生损耗,因此网络中总流入碳流量与总流出碳流量相等,线路碳损将累计叠加于下级节点,系统总碳流量仅与网络所包含发电厂的发电量与发电厂的电碳因子有关.由图8可知,末端节点的无损节点碳势相较于有损节点碳势最大差值达到了0.03 kg/(kW·h),表明末端节点每消耗1 kW·h电能,线路损耗引起的线路碳排放将会达到30 g,占系统总碳排放的3%.因此,使能源就近消纳,减少输电线路损耗与输电侧至用户之间的传输环节,对减少电力系统碳排放具有重要意义.

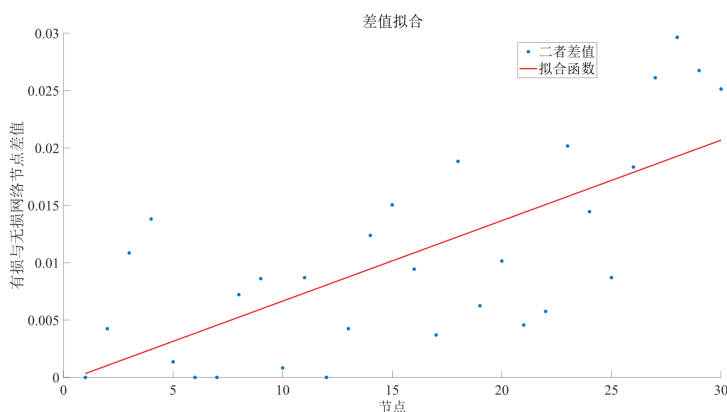


图8 排序后30节点有损与无损节点网络碳势的差值拟合曲线

2.3 IEEE 118节点无损网络运算速度分析

如图9所示,为验证该模型对复杂网络的计算速度,采用IEEE无损118节点网络进行验证.由于118节点网络的数据量巨大,本文对其有功潮流数据与碳排放数据不进行列举.此118节点包括54个发电机节点、23个传输线节点和41个负载节点,实际电力系统运行中,网络中潮流的方向不会在短时间内发生突变,因此该算法在对电网重构一次后,重构算法部分短时间内无需动作,仅需执行迭代算法部分,这极大缩短了实际应用中的运行时间.

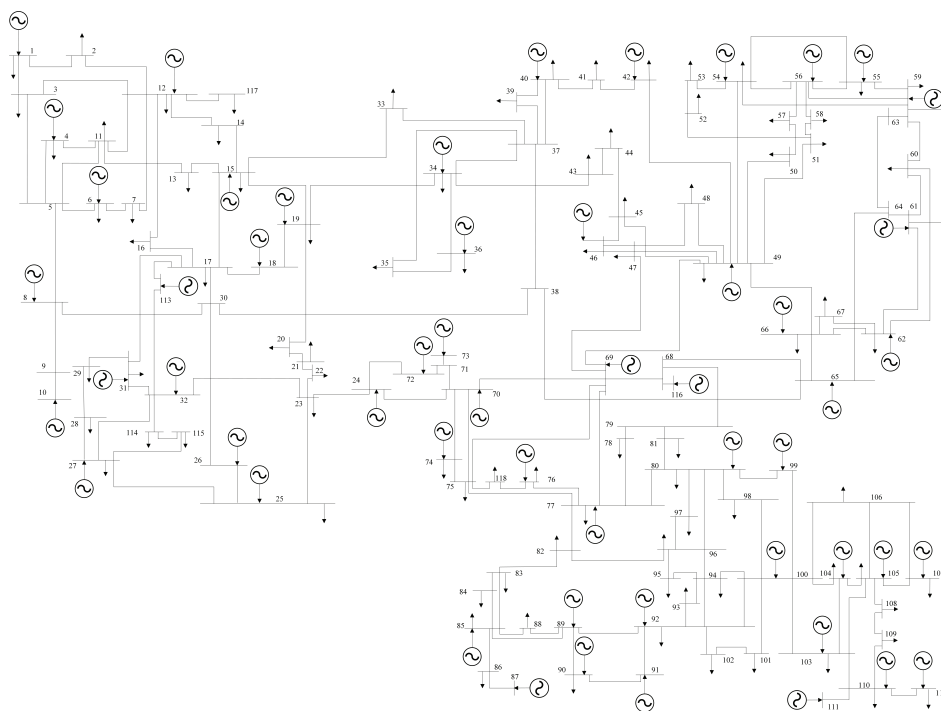


图9 IEEE无损118节点网络

图10为118节点网络重构后各个节点之间的相互关系,存在颜色标注的坐标 (x,y) 点表示第 x 节点与第 y 节点之间存在有功功率的传输.可以看出,经过节点重构后,节点功率矩阵中的元素均处于矩阵对角线的一侧,此时网络中有功的流动与节点的序号为正相关,可以进行节点碳势的迭代计算.经验证,该算法在118节点网络中重构时间小于4 s,迭代算法部分运行时间小于1.5 s,满足工程实际对时效性的要求.在后续应用中,若需积分计算系统碳排放量,则需参考迭代算法部分运行的仿真时长作为积分长度进行计算.

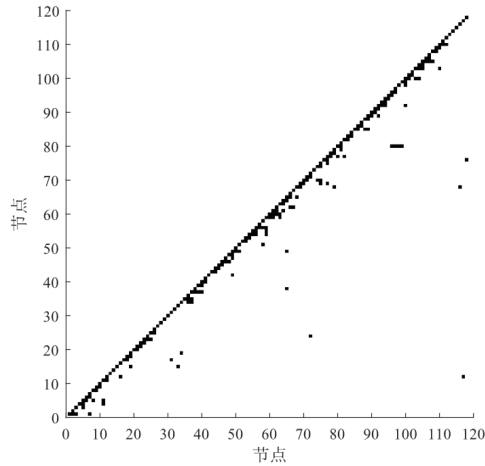


图 10 重构后的IEEE 118节点网络节点关联性示意图

2.4 与雅可比迭代模型比较

通过对算法不断优化,30节点网络通过该算法模型运行一次所需时间不超过1 s,符合相关工程实际应用需求,且一次运行后即可得到排序后的节点顺序,后续运行模型无需进行排序步骤,每次运行时间可以缩短至0.2 s,满足实际工程应用对实时性的要求.尽管雅可比迭代算法公式简单,但每次更新迭代使用的向量为上次迭代出的完整向量,并没有对向量中每个元素进行实时更新迭代.使用雅可比迭代模型还存在收敛速度较慢、占据的存储空间较大、算法所需时间长等缺点,其具体迭代次数由式(26)决定,即

$$\frac{n}{\max\{n_s, n_r\}} \leq k \leq n - \max\{n_s, n_r\} + 1, \quad (26)$$

式中: n 为网络总的节点数, n_s 为纯电源节点数, n_r 为纯负载节点数.

以30节点6源网络为例,纯电源节点共有3个,分别为1、11和13节点;纯负载节点共有5个,分别为7、17、19、26和29节点,因此该网络使用雅可比迭代法迭代次数根据式(26)计算得出应在6~25次之间,30节点最高达到25次迭代,并且每次迭代伴随着30维列向量的更新,由此可见雅可比迭代模型运算步骤多且复杂.因此在实际工程应用中一般不直接使用雅可比迭代法,而用其改进方法.

本文所提出的矩阵模型算法,在对目标矩阵进行排序后,只需进行一次迭代,并且后续不需要再进行排序处理,极大节省了原本需要迭代的运算步骤和运算时间.该网络重构模型不仅可以使用时功率数据作为输入,也可以将某一时段的能耗数据作为输入,区别在于功率输入对应着节点碳势与碳流密度.若输入为某一段时间的能耗数据,对应输出则应为该段时间内流过电能产生二氧化碳的量.因此,在实际工程应用中,该模型不仅可以用来检测线路实时的碳流速率和节点碳势,也可计算某段时间线路上产生的二氧化碳量.

3 实时电碳因子对风光火储园区运行调度的影响

上文提出了一种可以根据电力系统有功潮流实时计算节点碳势及线路碳流密度的方法,本节对其在传统风光火储综合能源系统调度中产生的影响进行简要分析.

3.1 风光火储模型建立

选取北方某一个传统风光火储系统的园区进行数学建模,该园区主要出力为园区的风电光伏出力,主电网作为后备能源对园区负荷进行兜底,在风电光伏难以满足园区负荷时动作.由于全天时间内主网清洁能源发电

量存在波动,园区在一天不同时间段从主网购电的时间也存在差异,随之产生的碳排放量也具有时间尺度上的差异.因此,园区应选择电能含碳量较低的时段从主网购电,而在含碳量较高的时段应优先利用储能装置进行供能.这一策略能够有效减少火电厂的出力,从而降低系统的碳排放量,同时也有助于提高清洁能源的并网比例.为了进一步验证,本节选取园区某日的运行数据,并结合上文模型计算得到的主网动态碳排放因子数据进行仿真分析,旨在探究主网购电时段的选择对园区系统调度的影响,分析不同购电时段下的碳排放以及相应经济性的变化,为园区碳排放优化和清洁能源调度提供理论支持^[26-28].

3.1.1 光伏出力模型

$$P_V(t) = \begin{cases} P_{ST} \frac{G_{AC}}{G_{ST}} [1 + k_{PV}(T_{PV} - T_{ST})], \\ T_{PV} = T_h + 30 \frac{G_{AC}}{1000}, \end{cases} \quad (27)$$

$$0 \leq P_{VP}(t) \leq P_V(t), \quad (28)$$

$$P_V(t) = P_{VP}(t) + P_{lv}(t), \quad (29)$$

式中: G_{AC} 、 T_{PV} 为光伏板光照强度与实际温度; G_{ST} 、 T_{ST} 为标准光照强度、测试温度; k_{PV} 为温度系数, T_h 为实际运行的环境温度; $P_V(t)$ 与 $P_{VP}(t)$ 为光伏实际发电功率与被系统消纳的光伏发电功率, $P_{lv}(t)$ 为 t 时刻系统的光伏弃用量.

3.1.2 风电出力模型

$$P_W(t) = \begin{cases} 0, & v < v_{in}, v > v_{out}, \\ P_e \frac{v - v_{in}}{v_e - v_{in}}, & v_{in} \leq v \leq v_e, \\ P_e, & v_e < v \leq v_{out}, \end{cases} \quad (30)$$

$$0 \leq P_{WP}(t) \leq P_W(t), \quad (31)$$

$$P_W(t) = P_{WP}(t) + P_{lw}(t), \quad (32)$$

式中: v 为风机实际运行风速, P_e 为风机额定运行功率, v_{in} 、 v_{out} 为风机投入运行与切出时的风速, $P_W(t)$ 与 $P_{WP}(t)$ 为 t 时刻风电机组实际出力与预测出力, $P_{lw}(t)$ 为 t 时刻的风电弃用量.

3.1.3 储能设备模型

$$soc(t) = soc(t-1) + P_{cha}(t)\Delta t\eta_{cha} - P_{dis}(t)\Delta t/\eta_{dis}, \quad (33)$$

$$0 \leq P_{cha}(t) \leq P_{cha,max} = \rho_e soc_{max}, \quad (34)$$

$$0 \leq P_{dis}(t) \leq P_{dis,max} = \rho_d soc_{max}, \quad (35)$$

$$soc_{min} \leq soc(t) \leq soc_{max}, \quad (36)$$

式中: $soc(t)$ 为 t 时刻储能剩余能量, $P_{cha}(t)$ 为单位时间的储能充电量, $P_{dis}(t)$ 为单位时间的储能放电量, η_{cha} 为储能充电效率, η_{dis} 为储能的放电效率, $P_{cha,max}$ 为储能设备的最大充电速率, $P_{dis,max}$ 为储能设备的最大放电速率, 本文储能装置的充放电速率与储能设备的最大容量有关, ρ_e 、 ρ_d 分别为储能设备充放电系数, 本文设置为0.5, soc_{min} 、 soc_{max} 为储能设备保证安全寿命下的最小储能量与最大储能量.

3.1.4 精准碳排放约束模型

$$m_{CO_2}(t) = ECF(t)P_f(t), \quad (37)$$

式中: $m_{CO_2}(t)$ 为 t 时刻主网购电的二氧化碳排放量, $ECF(t)$ 为 t 时刻主网购电的电碳因子, $P_f(t)$ 为 t 时刻的主网购电量.

3.1.5 柔性负荷模型

$$\sum_{t=1}^T P_Z(t) = \sum_{t=1}^T P_z(t), \quad (38)$$

式中: $P_Z(t)$ 为 t 时刻原始可转移负荷量, $P_z(t)$ 为需求响应后时刻可转移负荷量. 本文风光火储模型为日前调度, 因此 T 值取24.

3.1.6 功率平衡约束

$$P_{VP}(t) + P_{WP}(t) + P_f(t) + P_{dis}(t) = P_l(t) + P_z(t) + P_{cha}(t) + P_{lv}(t) + P_{lw}(t), \quad (39)$$

式中: $P_l(t)$ 为 t 时刻的园区固定负荷量.

3.2 风光火储园区运行成本

3.2.1 主网购电成本

$$C_1 = \sum_{t=1}^T c_f P_f(t), \quad (40)$$

式中: C_1 为从主网购电与二氧化碳成本之和, c_f 为主网购电成本系数.

3.2.2 风电光伏机组运行成本

$$C_2 = \sum_{t=1}^T c_w P_{WP}(t), \quad (41)$$

$$C_3 = \sum_{t=1}^T c_v P_{VP}(t), \quad (42)$$

式中: C_2 、 C_3 为风电、光伏设备的运维成本, 本文通过风电、光伏成本系数 c_w 、 c_v 与风电、光伏消耗量 $P_{WP}(t)$ 、 $P_{VP}(t)$ 计算风电与光伏的运维成本.

3.2.3 储能运行成本

$$C_4 = c_s \sum_{t=1}^T [P_{cha}(t) + P_{dis}(t)], \quad (43)$$

式中: C_4 为储能装置的日运行成本, c_s 为储能装置运维成本系数.

3.2.4 精准碳排放成本

传统碳交易仅对某个地区的边界碳排放因子进行加权计算, 并没有考虑电力系统网络中新能源的波动性对碳排放的实时性影响, 本文采用上文实时计算碳排放因子的方法对二氧化碳进行实时计算, 从而使系统的实时碳排放参与调度, 具体成本如式(44)所示:

$$C_5 = \sum_{t=1}^T c_{CO_2} m_{CO_2}(t), \quad (44)$$

式中: C_5 为园区二氧化碳排放惩罚成本, c_{CO_2} 为二氧化碳惩罚系数.

3.2.5 系统运行目标

日前调度目标 f 为系统总运行成本 C 最小, 其中:

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5, \quad (45)$$

$$f = \min\{C\}. \quad (46)$$

3.3 精准碳排放对风光火储系统调度的影响

图11 (a) 为园区某日通过上文方法计算出的动态电碳因子的动态趋势与固定电碳因子对照. 图11 (b) 为两种电碳因子调控模式下的负荷分布.

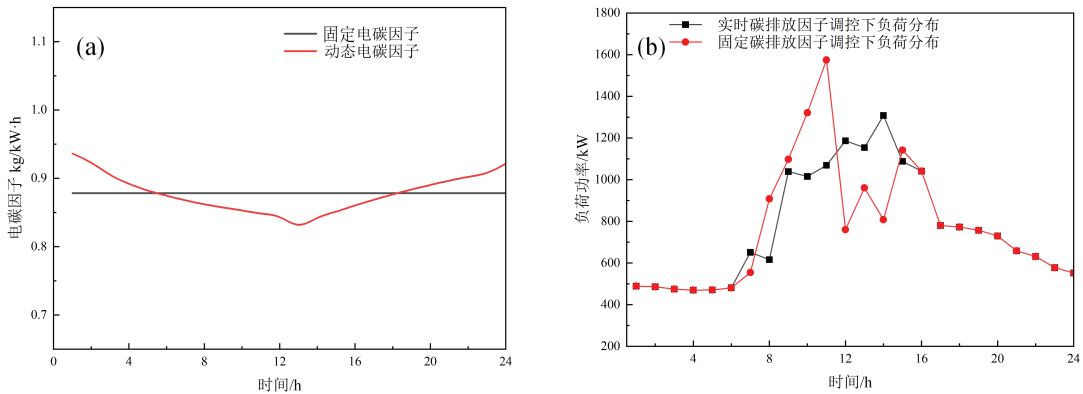


图 11 两类电碳因子变化趋势与其影响下的园区负荷分布

由图11 (b) 可以看出, 实时电碳因子对平滑调控柔性负荷的分布有显著作用, 负荷以主网实时的含碳量作为参考进行转移, 尽可能地在主网碳价较低时投入运行, 并且实时碳价也可以对储能装置的动作时间进行调控. 由图12可以看出, 加入精准碳排放因子前后储能容量的动作时间也相应改变, 尤其是储能放电时间, 当某个时刻的清洁能源不足以满足负荷需求, 需要选择储能放电或向主网购电以满足负荷需求, 此时采用精准碳排放因子可以使储能装置在主网碳含量较高时进行释放, 以达到减少系统碳排放的目的.

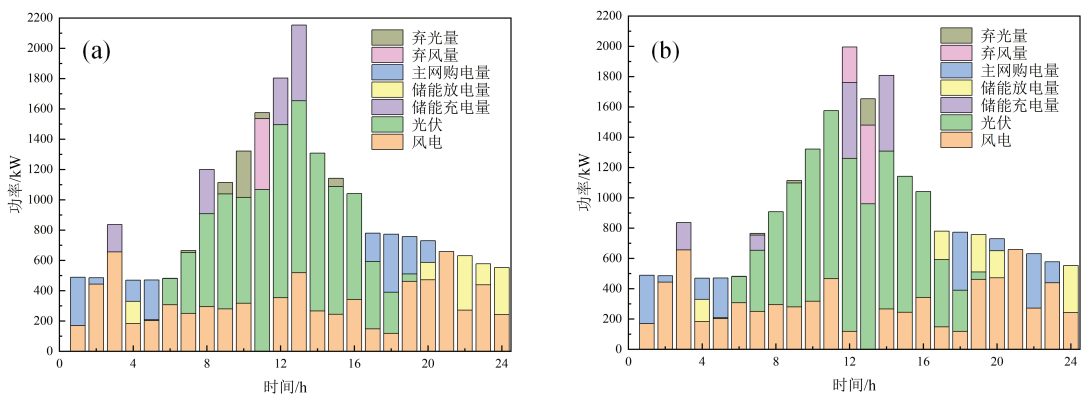


图 12 固定电碳因子 (a) 与实时电碳因子 (b) 调控下的功率分布

由图12可以看出, 实时碳排放因子对需求响应中柔性负荷的转移产生了一定影响, 并且由于负荷对实时碳价的响应, 系统总运行成本也相应降低. 表7为系统两种碳交易方法的调度结果对比.

表 7 固定电碳因子与实时电碳因子园区运行成本与碳排放量对比

	运行成本/元	碳排放量/千克
固定碳排放因子	5 702.518 6	1 805.931 2
实时碳排放因子	5 693.732 2	1 718.066 7

相比区域固定碳排放因子, 实时碳排放交易机制使系统运行成本有所下降, 且碳排放量下降了约5%. 调度结果表明, 在长时间尺度调度情况下, 采用实时碳排放因子法更能精准有效地降低系统成本与碳排放, 故计算电网各个节点节点碳势具有必要性.

4 结论

本文在现有电力系统网络中线路碳流量计算追踪的基础上,考虑线路损耗对电力系统碳排放的影响,提出了一种新型追踪线路碳流的计算方法,解决了系统网络节点数量增加时电力系统中碳流难以追踪的问题,并使碳流追踪的计算速度与计算便捷性大幅度提升.在风光火储系统模型上的验证结果表明,在日前调度中相较于传统区域电碳因子的碳交易方法,实时电碳因子可以更精准地对负荷进行调度,碳排放下降了约5%,系统运行成本也有所降低.因此,本文提出的实时电碳因子对碳交易市场与综合能源系统低碳运行具有重要的指导意义和较强的实际工程应用性.

参考文献:

- [1] 吴含欣,董树锋,张祥龙,等.考虑碳交易机制的含风电电力系统日前优化调度[J].电网技术,2024,48(1):70-80.
WU H X, DONG S F, ZHANG X L, et al. Optimal dispatching of power system with wind power considering carbon trading mechanism[J]. Power System Technology, 2024, 48(1): 70-80. (in Chinese)
- [2] WANG K K, SU X W, WANG S H. How does the energy-consuming rights trading policy affect China's carbon emission intensity?[J]. Energy, 2023, 276: 127579.
- [3] ZHANG X S, GUO Z X, PAN F, et al. Dynamic carbon emission factor based interactive control of distribution network by a generalized regression neural network assisted optimization[J]. Energy, 2023, 283: 129132.
- [4] WANG L K, ZHANG M, SONG Y. Research on the spatiotemporal evolution characteristics and driving factors of the spatial connection network of carbon emissions in China: New evidence from 260 cities[J]. Energy, 2024, 291: 130448.
- [5] SHI X Y, HUANG X X, ZHANG W X, et al. Examining the characteristics and influencing factors of China's carbon emission spatial correlation network structure[J]. Ecological Indicators, 2024, 159: 111726.
- [6] YANG L H, YE F F, HU H B, et al. A data-driven rule-base approach for carbon emission trend forecast with environmental regulation and efficiency improvement[J]. Sustainable Production and Consumption, 2024, 45: 316-332.
- [7] LIAN W W, SUN X Y, WANG Y X, et al. The mechanism of China's renewable energy utilization impact on carbon emission intensity: Evidence from the perspective of intermediary transmission[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 350: 119652.
- [8] MA S Y, LIU H, WANG N, et al. Incentive-based integrated demand response with multi-energy time-varying carbon emission factors[J]. Applied Energy, 2024, 359: 122763.
- [9] LIU J Y, XU F, LYU Y. How an emission trading system affects carbon emissions? Evidence from the urban agglomeration in the Middle Reaches of the Yangtze River, China[J]. Ecological Indicators, 2024, 160: 111865.
- [10] GAO Y, LIU G Y, MENG F X, et al. A carbon responsibility allocation approach with incentives mechanism based on carbon emissions and carbon offsets accounting[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 434: 139814.
- [11] GAN T Q, ZHOU Z Y, LI S B, et al. Carbon emission trading, technological progress, synergetic control of environmental pollution and carbon emissions in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 442: 141059.
- [12] FAN S L, XU G D, CHEN Z P, et al. Carbon-embedded energy coordination strategy in park-level integrated energy system considering time-varying carbon emission measurement[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 434: 139967.
- [13] AGRAWAL K K, JAIN S, JAIN A K, et al. Assessment of greenhouse gas emissions from coal and natural gas thermal power plants using life cycle approach[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2014, 11(4): 1157-1164.
- [14] HEIMBURGER A M F, HARVEY R M, SHEPSON P B, et al. Assessing the optimized precision of the aircraft mass balance method for measurement of urban greenhouse gas emission rates through averaging[J]. Elementa: Science of the Anthropocene, 2017, 5: 26.
- [15] HOLLAND S P, MANSUR E T. The short-run effects of time-varying prices in competitive electricity markets[J]. The Energy Journal, 2006, 27(4): 127-156.
- [16] 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 C Q, CHENG Y H, SUN Y L, 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)
- [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):44-49.
ZHOU T R, KANG C Q, XU Q Y, 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)

- [18] 李业辉,包维瀚,周特,等. 基于碳排放流迭代算法的分布式碳表系统(二):系统设计与验证[J]. 电网技术, 2023, 47(7): 2682-2695.
LI Y H, BAO W H, ZHOU T, et al. Distributed carbon meter system based on iterative calculation of carbon emission flow(II): System design and validation[J]. Power System Technology, 2023, 47(7): 2682-2695. (in Chinese)
- [19] 李业辉,李姚旺,刘昱良,等. 基于碳排放流迭代算法的分布式碳表系统(一):理论方法与分析[J]. 电网技术, 2023, 47(6): 2165-2174.
LI Y H, LI Y W, LIU Y L, et al. Distributed carbon meter system based on iterative calculation of carbon emission flow(I): Theoretical method and analysis[J]. Power System Technology, 2023, 47(6): 2165-2174. (in Chinese)
- [20] 龚昱,蒋传文,李明炜,等. 基于复功率潮流追踪的电力用户侧碳排放计量[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(17): 113-117.
GONG Y, JIANG C W, LI M W, et al. Carbon emission calculation on power consumer side based on complex power flow tracing[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(17): 113-117. (in Chinese)
- [21] 汪超群,陈懿,迟长云,等. 基于潮流分布矩阵的电力系统碳排放流计算方法[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(12): 4835-4842.
WANG C Q, CHEN Y, CHI C Y, et al. Calculation method of power system carbon emission flow based on power flow distribution matrix[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(12): 4835-4842. (in Chinese)
- [22] 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): 1683-1693.
WANG C Q, CHEN Y, WEN F S, et al. Improvement and perfection of carbon emission flow theory in power systems[J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1683-1693. (in Chinese)
- [23] YANG C, LIANG G Q, LIU J J, et al. A non-intrusive carbon emission accounting method for industrial corporations from the perspective of modern power systems[J]. Applied Energy, 2023, 350: 121712.
- [24] 冯欣,杨军. 考虑网络损耗的碳排放流理论改进与完善[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(5): 81-86.
FENG X, YANG J. Improvement and enhancement of carbon emission flow theory considering power loss[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(5): 81-86. (in Chinese)
- [25] 何恒靖,周尚礼,张乐平,等. 电网侧动态碳排放计量模型及方法[J]. 现代电力, 2025, 42(1): 39-44.
HE H J, ZHOU S L, ZHANG L P, et al. Model and methodology for dynamic carbon emission metering on power grid side[J]. Modern Electric Power, 2025, 42(1): 39-44. (in Chinese)
- [26] 刘广一,王继业,汤亚宸,等. 电网碳排放因子研究方向与应用需求的演变进程[J]. 电网技术, 2024, 48(1): 12-28.
LIU G Y, WANG J Y, TANG Y C, et al. Evolution process of research directions and application requirements of electricity carbon emission factors[J]. Power System Technology, 2024, 48(1): 12-28. (in Chinese)
- [27] 赵书琪,徐建军,腾新亮,等. 基于碳排放流理论的配电网低碳经济调度模型[J]. 浙江电力, 2024, 43(12): 122-132.
ZHAO S Q, XU J J, TENG X L, et al. A low-carbon and economically efficient dispatch model for distribution networks based on carbon emission flow theory[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(12): 122-132. (in Chinese)
- [28] 崔杨,邹新鹏,赵钰婷,等. 考虑动态电碳排放因子的新型电力系统电碳综合需求响应调度方法[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(10): 1-7.
CUI Y, ZOU X P, ZHAO Y T, et al. Electricity-carbon integrated demand response scheduling method for new power system considering dynamic electricity-carbon emission factor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(10): 1-7. (in Chinese)

责任编辑:刘敏