

动态碳流追踪驱动的综合能源系统优化调度模型

李再鹏¹, 陈湘萍¹, 叶华洋², 蔡永翔², 范强², 刘伟冲¹, 何金字¹

(1. 贵州大学电气工程学院, 贵阳 550025; 2. 贵州电网有限责任公司电力科学研究院, 贵阳 550002)

摘要: 在全球能源低碳转型中, 综合能源系统(integrated energy system, IES)作为实现“双碳”目标的关键, 面临两大核心挑战: 传统碳核算方法的局限性和多能流耦合系统的动态碳管理。传统碳核算方法因静态碳排放因子难以捕捉新能源出力波动、负荷时变特性对碳流变化的影响, 导致碳排放责任分摊不公平; 多能流耦合系统的动态碳管理面临跨能源碳排放追踪困难, 动态模型复杂度高问题。针对上述挑战, 提出了动态碳流传播理论框架, 核心内容包括: 1) 构建了多能流耦合矩阵与时变节点碳强度(time-varying node carbon intensity, TV-NCI), 构建了动态碳指标, 分析了新能源出力波动、负荷时变特性对碳流变化的影响, 为多能流耦合系统跨能源碳排放追踪提供了新的解决方案。2) 引入碳流介数中心性(carbon flow betweenness centrality, CFBC)指标, 分析了网架结构对碳流路径的影响, 识别了影响碳传播的关键节点。通过 IEEE 33 节点扩展系统实验验证所提方法有效降低了碳排放和新能源弃电率, 并揭示了网络拓扑对碳传播路径的影响。研究成果为 IES 低碳规划与运行提供了理论支撑。

关键词: 动态碳流; 综合能源系统; 低碳调度; 多能流耦合系统; 优化调度模型

Optimized Scheduling Model of Integrated Energy System Driven by Dynamic Carbon Flow Tracking

LI Zaipeng¹, CHEN Xiangping¹, YE huayang², CAI Yongxiang², FAN Qiang², LIU Weichong¹, HE Jinyu¹

(1. School of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Institute of Electric Power Science, Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550002, China)

Abstract: In the global low-carbon energy transition, the integrated energy system (IES), as the key to achieving the "dual carbon" goal, faces two core challenges: the limitations of traditional carbon accounting methods and dynamic carbon management of multi energy flow coupled systems. Traditional carbon accounting methods are difficult to capture the impact of fluctuations in new energy output and time-varying load characteristics on carbon flow due to static carbon emission factors, resulting in unfair allocation of carbon emission responsibilities. The dynamic carbon management of multi-energy flow coupled systems faces difficulties in tracking cross energy carbon emissions and high complexity of dynamic models. In response to the above challenges, a dynamic carbon flow propagation theoretical framework is proposed, which includes two aspects: 1) A multi-energy flow coupled matrix and time-varying node carbon intensity (TV-NCI) is constructed, and a dynamic carbon index is constructed, and the impact of new energy output fluctuations and time-varying load characteristics on carbon flow changes is analyzed, a new solution is provided for cross energy carbon emission tracking in multi-energy flow coupled systems. 2) By introducing the carbon flow betweenness centrality (CFBC) index, the impact of grid structure on carbon flow paths is analyzed and the key nodes that affect carbon transmission is identified. Through experimental verification of the IEEE 33-node extended system, the proposed method effectively reduces carbon emissions and new energy curtailment rates, and reveals the impact of network topology on carbon propagation paths. The research results provide theoretical support for the low-carbon planning and operation of IES.

Key words: dynamic carbon flow; integrated energy systems; low-carbon dispatch; multi-energy flow coupled system; optimized scheduling model

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51867007); 贵州省科技支撑项目(黔科合支撑[2025]一般102); 中国南方电网有限责任公司科技项目(GZKJXM20222314); 中国南方电网有限责任公司政研课题(060000RT24100528)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51867007); Guizhou Science and Technology Support Project (Qiankehe Support [2025] General 102); the Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (GZKJXM20222314); the Political Research Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (060000RT24100528).

0 引言

在可再生能源丰富的西南地区大力发展清洁能源,增加清洁能源消纳,对于推进“双碳”目标的实现和电网的长期可持续发展具有重要的战略意义。可再生能源为主导的综合能源系统(integrated energy system, IES)构成了新型电力系统的核心要素之一,这一系统不仅促进了多种能源之间的互补与共济,还实现了资源的协调优化与高效利用,极大地推动了新能源的有效整合与利用,增强了系统的运行可靠性。同时,它还有助于显著降低系统的碳排放量,为环境保护与可持续发展做出了重要贡献。

在综合能源系统中,电能、热能和天然气能展现出强耦合特性和高度的相互转化能力。为了降低系统碳排放并提高经济性,可以通过构建协调优化模型灵活调节不同需求和运行条件下的资源配置,以此提高能源使用效率^[1-2]。有学者构建了一个电转气 IES 双层优化模型和考虑风电不确定性的电-热 IES 分布鲁棒协调优化调度模型,验证了 IES 模型提升风电消纳水平的可行性^[3-4]。除了优化调度模型本身,市场激励机制也对系统的优化调度效率起重大作用,有学者提出电转气(power to gas, P2G)的碳交易市场激励机制,建立了 IEGN 综合碳成本模型,搭建了电-气互联网络(integrated electricity-gas network, IEGN)日前低碳经济调度模型^[5],最终提高了系统弃风消纳和低碳效益,证明了气网动态管存特性可进一步提高新能源消纳水平。这些研究证明了综合能源系统和多能耦合系统优化调度模型在提高新能源消纳水平以及系统经济性上的有效性。

在协调优化方法上,碳排放流理论凭借其高度的时空特性、碳责任溯源能力成为碳核算领域的重要研究方向^[6]。利用碳流追踪技术实时监测电力系统的碳排放流动与分布,可以为综合能源系统低碳决策提供支持^[7]。在综合能源系统中应用碳排放流理论,将碳排放虚拟为碳流伴随着多能流在系统中流动,可以把碳排放责任灵活公平地分配给节点、线路和用户,精准地对综合能源系统进行低碳调度。基于电力系统碳排放流计算方法,推导考虑气网动态特性的天然气系统碳排放流计算方法,通过建立源荷互动两阶段低碳经济调度模型对电-气

互联系统进行了低碳经济调度求解^[8],验证了模型的低碳经济性和灵活性。通过提出一种兼顾碳捕集系统和碳排放流理论的电力系统低碳最优学习调度方法,建立系统日前调度和负荷需求响应调整的双层次交替最优调度模型并求解,解决了电力系统内部存在的不确定性^[9]。在综合能源系统优化调度中引入碳排放流理论,建立综合能源系统的双层调度模型验证了该模型具有提高能源利用率、降低运行成本和减少碳排放的效果^[10]。为研究需求响应对综合能源系统碳减排的影响,通过提出基于碳排放流理论的两阶段低碳经济调度模型。证明了该模型能有效促进系统降低负荷峰谷差、增强风电消纳能力、减少碳排放和碳交易成本^[11]。相比于单一的园区综合能源系统(park integrated energy system, PIES)经济调度,利用外网电能的碳流密度对其隐含碳排放进行精确核算,建立 PIES 低碳经济调度双层优化模型,可以在只提高 4.82 % 运行成本的前提下,降低 PIES 约 21.37 % 的碳排放量。何良策等人构建了电-热综合能源系统的低碳经济调度模型,通过碳排放流理论和需求响应机制优化负荷侧行为,进一步降低碳排放^[12]。庞清仑等人首先对综合能源系统中各能源的碳排放进行量化分析,提出了一种以降碳为目标的综合能源碳排放优化模型,并通过粒子群算法进行求解,验证了模型的有效性,显著降低了碳排放量并提高了新能源消纳能力^[13]。

建立基于碳排放流理论的低碳经济调度模型可以有效降低碳排放和碳交易成本。但是目标函数仅仅只考虑运行成本或者总体碳排放,不能满足日益复杂的多能流综合能源系统的精细化调度管理^[14-15]。因此提出关键指标并将其加入目标函数的方法有着巨大的研究前景。

学者通过定义能源管网扩建规划的管道风险指标,并建立基于能源网络机会约束的 IES 多目标随机规划模型,实现了投资成本和能源管道风险的协同优化^[16];通过定义能源质量系数(energy quality factor, EQC)对各种能源形式质量进行衡量,建立了综合考虑烟效率和经济性的 IES 多目标规划模型,可有效提高能源综合利用水平^[17];提出电力和富氢天然气综合能源系统(electricity and hydrogen-rich natural gas-integrated energy system, E-HNG IES)的动态能量流优化方法,利用有限差分 and 线性

化方法构建了E-HENG IES的动态能量流模型,实现了电力和天然气系统的协调优化^[18]。通过引入“电碳比”的概念,刻画了储能装置的碳排放特性,挖掘供能-储能双侧协调低碳调度潜力,在此基础上,构建了多元不确定性的综合能源系统低碳经济调度模型,实现模型的快速高效求解^[19]。

然而,当前指标性目标函数的研究主要集中在定量分析上,而在对能源网络中碳流动态特性的建模以及多能源系统协同优化调度模型在多能流耦合下的动态碳责任分配方面尚缺乏深入有效^[20-22]的探究。特别是动态碳流追踪理论的缺失使得无法从碳流流动机理上充分挖掘降碳潜力,难以满足综合能源系统实际应用的需求。

鉴于此,本文提出以下创新观点:1)引入时变节点碳强度(time-varying node carbon intensity, TV-NCI)的概念,并将其作为综合能源系统低碳优化的核心目标,旨在在降低系统碳排放的同时最大限度地控制经济成本;2)首次提出碳流介数中心性(carbon flow betweenness centrality, CFBC),明确网架拓扑结构对碳流流动的影响,识别碳流传播的关键枢纽,为新能源选址提供有力参考;3)通过构建耦合矩阵将电、热、气网络的碳流传播进行统一建模,有效解决多能流系统中碳排放责任的交叉分配问题。

1 建模过程

1.1 多能流碳流动态建模

目前,多能流系统主要以热电联产为核心,整合了多种形式的能量流,为不同用户提供电、热、冷等多种能源。通过各类能源的多能互补和梯级利用,该系统能有效降低供能成本,提升能源利用率^[23]。本文构建了一个包含燃气发电(power to gas, P2G)和热电联产(combined heat and power, CHP)设备的综合能源系统模型,并对其进行了理论验证。

如图1图所示,电网系统接入风电、光伏机组和柴油机组,并配备储能设备。电网系统与天然气网络通过燃气轮机和P2G设备相连,电网多余的电力输送至P2G设备,该设备可将电能转换为天然气或氢气进行储存。此外,天然气网络还能通过燃气轮机向电网输送电能。热力网络与天然气网络则通过燃气锅炉连接,燃气锅炉从天然气网络获取天然气,并向热力网络提供热能。CHP设备连接热力网络和电网系统,利用天然气或氢气驱动发电,在向电网供电的同时,将设备余热输送到热力网络。

1.1.1 电力碳流模型

本文首先对电力网络中的碳流传播进行建模。电力作为综合能源系统中最主要的能量形式,是电

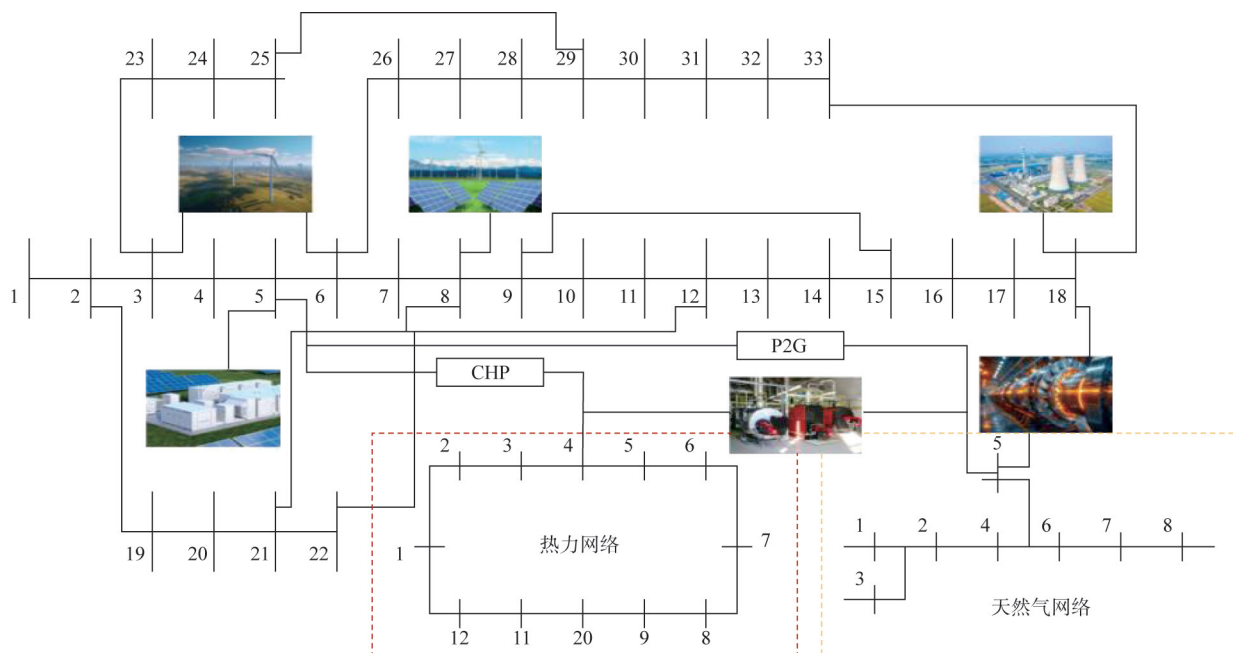


图1 多能流系统

Fig. 1 Multi-energy flow system

力网络与热力网络、天然气网络之间碳流交互的核心媒介。基于电力碳排放流理论, 本文将发电机组产生的碳排放视为虚拟碳流, 该碳流随线路潮流转移至电网侧和负荷侧^[24-25]。在此基础上, 本文构建了电力碳流模型, 并提出了电力碳流守恒方程的概念, 将碳排放因子嵌入传统电力潮流分析中。

1) 碳流率 R

碳流率 R 用来表征单位时间内通过节点或支路的碳流量, 单位为 tCO_2/h 。

$$R = \frac{dF_{\text{CEF}}}{dt} \quad (1)$$

式中: R 为碳流率; F_{CEF} 为一定时间内流过节点或支路的碳排放总量; t 为时间。

2) 节点碳排放强度 (NCI)

碳排放强度用来表示单位能量对应的在发电侧产生的等效碳排放量, 单位为 tCO_2/MWh 。节点碳排放强度 (NCI) 一般表示流入节点的总碳流量与总电量之比, 即节点单位电量等效的碳排放量。

$$d_i^{\text{NCI}} = \frac{\sum_{l \in N^+} P_l \rho_l}{\sum_{l \in N^+} P_l} = \frac{\sum_{l \in N^+} R_l}{\sum_{l \in N^+} P_l} \quad (2)$$

式中: d_i^{NCI} 为节点 i 的碳排放强度; N^+ 为向节点 i 流入电量的线路集合; P_l 为从支路 l 注入节点 i 的电量; ρ_l 为支路 l 的碳流强度; R_l 为支路 l 的碳流率。

为快速更新节点碳强度 (NCI), 可以构建动态指标 TV-NCI, 通过建立电力碳流守恒方程将节点碳强度与潮流计算紧密关联, 仅需提高潮流计算频率即可实现。基于质量守恒定律和网络流理论, 将碳排放视作在网络中流动的“虚拟量”, 其传播路径与电力潮流完全一致。用户在某节点的用电碳足迹不仅受本地发电机影响, 还需综合考虑从其他节点传输而来的电力所隐含的碳排放, 确保碳流在网络中的输入、输出与本地源汇达到平衡。

3) 电力碳流守恒方程

根据电网潮流计算结果和本地碳源, 可以得出电力碳流守恒方程, 该方程表征了节点处碳流与潮流的守恒关系。

$$\mathbf{A}_e \cdot d_{e,i}^{\text{NCI}} = \mathbf{B}_e \quad (3)$$

式中: $\mathbf{A}_e \in \mathbf{R}^{N \times N}$, 为电力碳流关联矩阵, 元素 $A_e(i, j) = -|p_{ij}|$ (线路潮流绝对值), 对角元素 $A_e(i, i) = \sum_k |p_{ik}| + P_{L,i}$, 其中 $P_{L,i}$ 为线路流出功

率, p_{ik} 为本地负荷; $\mathbf{B}_e \in \mathbf{R}^N$, 为节点碳源项, $B_e(i) = \sum_{g \in G_i} p_g \cdot F_{\text{EF1, gas}}$, 其中 $F_{\text{EF1, gas}}$ 为发动机碳排放因子, G_i 为第 i 台发动机, p_g 为节点 g 的碳流强度; N 为节点总数量。

在电力碳流守恒方程 $d_{e,i}^{\text{NCI}}$ 中, 待求量通过该方程得以确定, 从而可以计算各节点的时变碳强度 (TV-NCI)。由于电网中的每个节点通常仅与少数相邻节点直接相连, 导致描述节点间关系的矩阵中大部分元素为 0, 因此该方程通常呈现为稀疏线性方程组。求解此类方程时, 常采用 LU 分解或迭代法, 并在求解过程中对矩阵 $\mathbf{A}_e$ 添加小量对角线元素进行正则化处理, 以避免奇异现象。

基于此方程, 各节点的碳排放责任得以明确, 为系统提供了动态碳信号。此外, 电力碳流守恒方程作为电-热-气多能流耦合模型的核心模块, 为跨能源碳责任分配提供了坚实的数学框架。

1.1.2 热力碳流模型

典型的热力系统由热力站、热力管道和换热站构成, 其中热力站充当热源, 换热站则作为热力负荷。热力通过热力管道网络输送至负荷端。借鉴碳排放流理论, 将热力系统的碳排放虚拟化为随热力管道流动的碳流, 并将碳排放责任分配至负荷端^[26]。同时, 考虑到管道的热延迟效应 (时滞 τ), 构建了热力碳流传递方程。

$$C_{\text{CP}_k}(t) = \frac{\sum_j [Q_{ji}(t - \tau_{ji}) \cdot C_{\text{CP}_k}(j, t - \tau_{ji})] + B_h(i, t)}{Q_{\text{load}}(i, t)} \quad (4)$$

式中: $C_{\text{CP}_k}(t)$ 为 t 时刻单位热量等效的碳排放; $C_{\text{CP}_k}(j, t - \tau_{ji})$ 为节点 j 在 $t - \tau_{ji}$ 时刻单位热量等效的碳排放; Q_{ji} 为从节点 j 到 i 的热流量 (含管道损耗), kW ; $B_h(i, t)$ 为节点 i 的热源碳排放; $Q_{\text{load}}(i, t)$ 为 t 时刻节点 i 的负荷流量。

热电联产设备 (CHP) 是综合能源系统中的核心设备, 能够同时产生电力和热能的高效能源利用系统, 在热力系统中作为主要碳排放源, CHP 设备同时产生电和热, 需分配碳排放。

$$B_e(i) = \eta_e \cdot P_{\text{CHP}} \cdot F_{\text{EF2, gas}} \quad (5)$$

$$B_h(i) = \eta_h \cdot Q_{\text{CHP}} \cdot F_{\text{EF2, gas}} \quad (6)$$

式中: $B_e(i)$ 、 $B_h(i)$ 分别为节点 i 的电力碳源和热力碳源; η_e 、 η_h 分别为电、热效率; $F_{\text{EF2, gas}}$ 为天然气

碳排放因子; P_{CHP} 、 Q_{CHP} 分别为 CHP 的有功功率和无功功率。

1.1.3 电热气耦合模型

在综合能源系统中,利用电转气设备(P2G)将产生的二氧化碳气体与电解水后的氢气转化为甲烷,不仅可以降低系统的碳排放,还能将风能、太阳能等可再生能源产生的多余电力转化为氢气或天然气,从而提高可再生能源的利用率,减少弃风弃光现象^[27-28]。天然气网络中的碳流随着天然气管道中的气体流动,参考碳排放流理论,本文建立其碳流关系如下。

$$B_{\text{gas}}(i) = B_{\text{gas}}(i) - \eta_{\text{P2G}} \cdot P_{\text{P2G}} \cdot R_{\text{CO}_2\text{-capture}}^{\text{EF}} \quad (7)$$

式中: $B_{\text{gas}}(i)$ 为天然气网络中节点 i 处的碳流量; η_{P2G} 、 P_{P2G} 分别为 P2G 设备的效率和功率; $R_{\text{CO}_2\text{-capture}}^{\text{EF}}$ 为碳捕集率。

在综合能源系统(电-热-气)多能流耦合情况下,不同能源网络通过设备(如 CHP、电锅炉、燃气轮机等)相互转换和传递能量。本文建立跨能源耦合矩阵用于量化这种能源转换过程中的碳排放传递关系,将电力、热力和天然气能源网络的碳流方程连接成统一模型。矩阵的结构为分块矩阵。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_e & \mathbf{C}_{eh} & \mathbf{C}_{eg} \\ \mathbf{C}_{he} & \mathbf{A}_h & \mathbf{C}_{hg} \\ \mathbf{C}_{ge} & \mathbf{C}_{gh} & \mathbf{A}_g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{C}_e^p \\ \mathbf{C}_e^h \\ \mathbf{C}_e^g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_e \\ \mathbf{B}_h \\ \mathbf{B}_g \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{C}_e^p$ 、 $\mathbf{C}_e^h$ 、 $\mathbf{C}_e^g$ 分别为电、热、气网络的节点碳强度向量(carbon potential), gCO_2/kWh ; $\mathbf{A}_e$ 、 $\mathbf{A}_h$ 、 $\mathbf{A}_g$ 分别为电力、热力、气网的碳流关联矩阵; $\mathbf{C}_{eh}$ 、 $\mathbf{C}_{he}$ 、 $\mathbf{C}_{hg}$ 、 $\mathbf{C}_{gh}$ 、 $\mathbf{C}_{ge}$ 为跨能源耦合矩阵; $\mathbf{B}_e$ 、 $\mathbf{B}_h$ 、 $\mathbf{B}_g$ 为各能源网络的碳源项。

1.2 时变节点碳强度(TV-NCI)动态计算方法

1.2.1 模型构建

传统碳强度指标(如节点 NCI)因其静态性和低分辨率,难以适应新能源渗透率提升及负荷动态变化的需求。风光出力波动、储能充放电、需求响应等因素导致碳排放强度在分钟至小时尺度上剧烈波动,而传统指标无法捕捉此类变化。固定碳排放因子亦无法区分“光伏大发时用电”与“火电主导时用电”的碳排放差异,进而影响用户侧减碳激励。在综合能源系统(integrated energy system, IES)中,电、热、气碳流的交互效应需动态追踪,然而当前方法仅局限于单一能源的考量。本文借鉴节点碳强度理念,引入时变节点碳强度(time-varying node

carbon intensity, TV-NCI)概念,并为其构建了一套动态更新机制,同时开发了多能流耦合建模及网络化分析技术,从而实现了碳排放的精确追踪与责任归属的明确划分。该技术进一步量化了新能源波动性、储能系统状态及多能转换过程对节点碳强度的即时影响,为电力系统由“电量优化”模式向“碳流优化”模式的转变提供了坚实的理论基础。

1)建立时变节点碳强度 $C_i^{\text{TV-NCI}}(t_k)$ 离散时间模型(采样周期 Δt)。

$$C_i^{\text{TV-NCI}}(t_k) = \frac{\sum_{j \in N_i} [P_{ji}(t_k) \cdot C_j^{\text{TV-NCI}}(t_{k-1})] + B_i(t_k)}{P_{\text{load},i}(t_k) + \sum_{m \in N_i} P_{im}(t_k)} \quad (9)$$

式中: $P_{ji}(t_k)$ 为 t_k 时刻从节点 j 到 i 的功率; $B_i(t_k)$ 为 t_k 时刻节点 i 的本地碳源; N_i 为所有与节点 i 相连接的节点集合; m 为 N_i 集合内的节点编号、 k 为第 k 个采样周期编号。

2)建立 TV-NCI 更新机制。

TV-NCI 基于模型预测控制(MPC)框架,采用滚动时间窗口动态更新机制,结合实时数据和短期预测,确保碳强度计算的实时性与鲁棒性。其更新过程通过动态碳流矩阵 $\mathbf{A}$ 显式描述电、热、气系统的碳流交互,有效克服传统单能流模型的局限性。

滚动窗口优化采用分时段动态优化策略,在每个时间步长内,基于当前系统状态和未来预测信息,构建一个有限时间窗口的优化问题。目标函数旨在最小化动态节点的碳强度,同时满足能量平衡和设备运行约束条件。求解当前窗口内的优化问题后,仅执行第一个时间步的控制动作,随后窗口向前滚动至下一时刻,并利用最新实测数据更新系统状态和预测模型。这种闭环机制能够实时反馈累积误差,其中预测误差主要源于负荷和可再生能源出力。在每次窗口滚动时,通过比较实际测量值与预测值的偏差,动态调整后续预测模型的参数,从而校正预测误差。滚动窗口大小的选择取决于系统惯性(如热力管网的热延迟、储能设备的充放电周期),窗口需覆盖主要动态过程,但鉴于预测误差通常随时间增长,窗口长度不宜超过预测有效期。因此,本文选择了 4 h 的时间窗口,步长为 15 min。图 2 为 TV-NCI 滚动更新算法。

TV-NCI 滚动更新算法流程如下。

第一步,收集节点负荷、新能源出力、储能状

态、多能流耦合设备输出功率及碳转移系数等实时数据;

第二步, 预测未来 1 h 的新能源出力(光伏)曲线、负荷需求曲线及多能流耦合设备的行为模式;

第三步, 基于实时数据与预测结果, 更新多能流耦合矩阵 A 和碳源向量 B ;

第四步, 求解方程 $A \cdot D_{CP} = B$, 获取未来时间窗口内各节点的 TV-NCI(D_{CP} 矩阵各分量);

第五步, 输出更新后的 TV-NCI;

第六步, 时间窗口滑动, 重复步骤一到五。

其中 TV-NCI 的更新方程基于多能流碳流守恒模型。

$$A \cdot D_{CP} = B \quad (10)$$

式中: $A \in R^{N \times N}$ 为动态碳流矩阵, 对角线元素为节点负荷(标么值), 非对角元素为反映碳流传播路径的线路潮流(含方向)和跨能源设备的碳转移系数; $B \in R^N$, 为碳源向量, 包含发电机组等设备的直接碳排放; $D_{CP} \in R^N$, 为待求的节点碳强度向量。

1.3 碳流介数中心性定义与关键节点识别算法

介数中心性是网络分析中的一个重要概念, 用于衡量网络中各个节点在信息流或资源流动中的中介作用程度, 它是指在网络中所有最短路径中经过该节点的路径的数目占最短路径总数的比例。具体而言, 一个节点的介数中心度越高, 通过该节点的最短路径数量越多, 意味着该节点在网络中更具有控制力或影响力。介数中心性一般应用在各种网络分析中, 比如在交通网络中识别交通瓶颈, 在生物网络中识别关键蛋白质或基因, 研究生物网络的结构和功能等。本文将介数中心性的概念引入电力系统的分析中, 以识别电力网络中碳流流动的关键节点。

传统碳减排研究多关注“源-荷”两端, 忽视了电网拓扑结构与能量传输路径对碳传播的影响, 因此本文将复杂网络介数中心性引入碳流分析, 提出碳流介数中心性(carbon flow betweenness centrality, CFBC)指标, 在获取电网系统的拓扑结构后, 可以通过图遍历算法或者矩阵运算计算网络中的所有节点对, 进而得出经过每个节点的最短路径数量, 然后得出每个节点的碳流介数中心度, 通过量化节点在碳流路径中的“中介”作用, 识别需优先改造的碳传播瓶颈。

1.3.1 定义与公式

节点 k 的碳流介数中心性(carbon flow betweenness centrality, CFBC)衡量其作为碳流传播关键枢纽的程度, 其值记作 $C_{CFBC}(k)$, 定义如下。

$$C_{CFBC}(k) = \sum_{i \neq j \neq k} \frac{\sigma_{ij}(k)}{\sigma_{ij}} \cdot \frac{C_{ij}}{C_{total}} \quad (11)$$

式中: σ_{ij} 为节点 i 到 j 的所有最短碳流路径数量; $\sigma_{ij}(k)$ 为经过节点 k 的最短路径数量; C_{ij} 为节点 i 到 j 的碳流量, gCO_2/h ; C_{total} 为系统总碳流量。

1.3.2 算法实现

图 3 为 CFBC 算法流程图。碳流介数中心性与网络拓扑图、节点碳排放强度有关, 计算碳流介数中心性的算法如下。

1) 构建碳流网络图, 获取电网拓扑结构数据, 包括节点、线路阻抗、容量、发电机碳排放因子、负荷分布与新能源出力等输入数据;

2) 通过改进的碳排放流算法, 求解各节点 NCI;

3) 计算线路等效碳排放因子 E_{Ei} , 线路 i (节点 j 到 i) 的等效碳排放因子为源节点 j 的碳强度;

4) 使用 Dijkstra 算法, 寻找从发电节点 s 到负

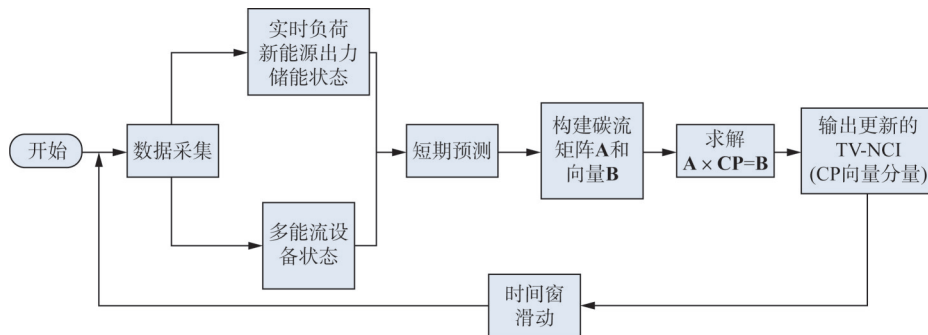


图 2 TV-NCI 滚动更新算法

Fig. 2 TV-NCI rolling update algorithm

荷节点 i 的路径,使得路径总权重(总碳排放)最小;

5) 计算节点 i 的介数中心性(CFBC),即所有经过该节点的路径贡献之和。

2 IES低碳优化调度模型

本研究构建了一个混合整数线性规划(mixed integer linear programming, MILP)模型,以最小化综合能源系统的总运行成本与碳排放成本为目标。为了满足 IES 调度中混合整数需求,模型通过 GLPK 求解器实现,采用分支定界法处理整数变量,并结合对偶单纯形法加速 LP 子问题求解。

2.1 目标函数

IES 低碳优化调度模型是在满足电力系统、热力系统、天然气网络的约束条件下,使得综合能源系统总碳排放成本和运行成本最小化。需同时考虑碳排放最小化和运行经济性,采用加权求和法将多目标优化转化为单目标优化问题。目标函数定义如下。

$$F = \min \{ \alpha \times T_{\text{TCE}} + \beta \times C_{\text{TOC}} \} \quad (12)$$

式中: F 为目标函数; α 、 β 为权重系数; T_{TCE} 为总碳排放(total carbon emission, TCE),即累加所有节点在所有时段的用电碳排放,通过时变节点碳强度(time-varying nodal carbon intensity, TV-NCI)加权负荷计算; C_{TOC} 为总运行成本(total operation cost, TOC),包括天然气网络燃料成本、储能设备维护成本及新能源弃电惩罚。

$$T_{\text{TCE}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N C_i^{\text{TV-NCI}}(t) \cdot P_{\text{load}}(t) \cdot \Delta t \quad (13)$$

式中: $C_i^{\text{TV-NCI}}(t)$ 为节点 i 在 t 时刻的碳强度, gCO_2/kWh ; $P_{\text{load}}(t)$ 为节点 i 在 t 时刻的负荷功率, kW ; Δt 为时间间隔, h ; T 为所有时段之和; N 为所有节点的集合。

C_{TOC} 的定义如下。

$$C_{\text{TOC}} = \sum_{t=1}^T \left(\sum_{g \in G} C_g(P_g(t)) + \sum_{s \in S} C_{\text{soc}}(S_s^{\text{SOC}}(t)) + \lambda \cdot P_{\text{curt}}(t) \right) \quad (14)$$

式中: $C_g(P_g(t)) = a_g \cdot P_g^2(t) + b_g \cdot P_g(t) + c_g$, 为发电机 g 的燃料成本函数, 美元/h, 其中 a_g 、 b_g 、 c_g 为成本系数; $C_{\text{soc}}(S_s^{\text{SOC}}(t)) = k_{\text{soc}} \cdot (S_s^{\text{SOC}}(t) - S_{\text{ref}}^{\text{SOC}})^2$ 为储能充放电维护成本, 防止 SOC 剧烈波动, $S_s^{\text{SOC}}(t)$ 为储能设备荷电状态, $S_{\text{ref}}^{\text{SOC}}$ 为放电前后荷电状态(SOC); k_{soc} 为储能维护成本系数; $P_{\text{curt}}(t)$ 为 t 时段的新能源弃电量, kW ; λ 为弃电惩罚系数, 美元/kW; G 为发电机组集合; s 和 S 分别为储能编号和储能集合。

2.2 约束条件

约束条件包括电力系统约束、热力系统约束、气网系统约束、跨能源耦合约束和碳强度约束。

2.2.1 电力系统约束

电力潮流平衡约束确保每个节点的发电出力(包括传统机组、新能源和储能放电)与负荷需求及线路传输功率匹配,是维持系统稳定运行的基础。

节点功率平衡约束保证了流入节点的功率和依附其上的碳流等于流出值,从而维持系统的功率供需平衡,这是电力系统和综合能源系统稳定运行的基础条件。

$$\sum_{g \in G_i} P_g(t) + \sum_{s \in S_i} \eta_{\text{dis}} P_{\text{dis},s}(t) = P_{\text{load},i}(t) + \sum_{j \in N_i} P_{ij}(t) + \sum_{s \in S_i} \frac{P_{\text{ch},s}(t)}{\eta_{\text{ch}}} \quad (15)$$

式中: G_i 为给节点 i 供电的发电机组集合; S_i 为接入节点 i 的储能集合; N_i 为节点 i 注入或流出功率的节点集合; η_{dis} 、 η_{ch} 分别为储能放电/充电效率; $P_{\text{dis},s}(t)$ 、 $P_{\text{ch},s}(t)$ 分别为储能 s 的放电/充电功率, kW 。

保证系统稳定运行,必须对线路传输容量和发电机出力进行限制,包括电网系统各节点之间的传

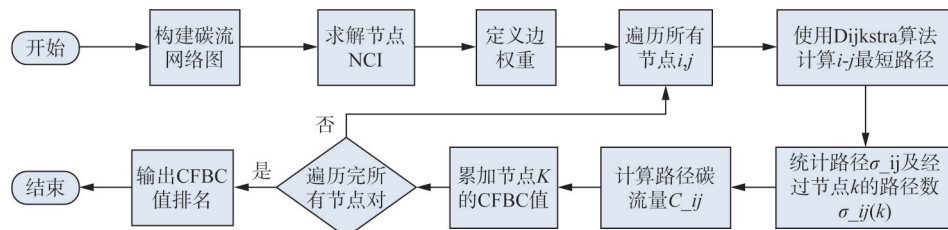


图3 CFBC算法流程图

Fig. 3 Flow chart of CFBC algorithm

输线路和连接到节点上的发电机组。

$$|P_{ij}(t)| \leq P_{ij}^{\max}, \forall t, \forall (i, j) \in \zeta \quad (16)$$

$$P_g^{\min} \leq P_g(t) \leq P_g^{\max}, \forall t, \forall g \in G \quad (17)$$

式中： $P_{ij}^{\max}$ 为 t 时刻节点 i 到 j 的最大传输容量； $P_g^{\max}$ 、 $P_g^{\min}$ 分别为发电机 g 最小输出功率和发电机 g 最大输出功率； t 为发电机组 g 任一正常工作时刻； g 、 G 分别为发电机组编号、任意时刻发电机组 g 正常工作状态集合； ζ 为任意时刻 i 、 j 正常连接的状态集合。

储能设备在电力系统中能起到削峰填谷的作用，一般用于存储新能源机组多余的绿电或者 CHP 设备、燃气轮机发出的电能，在负荷高峰区间释放电能以减少柴油机组的工作。调节储能设备的工作状态可以实现提高绿电消纳，也能影响 CHP 设备以及 P2G 设备的工作状态，达到降低整体碳排放的作用。因此储能设备是综合能源系统最主要的调节对象，储能设备 s 的运行约束基于其荷电状态 (SOC)，表示电池剩余电量占其额定容量的百分比，其值记作 S_s^{SOC} 。在储能系统中，SOC 用于优化能量的分配和使用，提高系统的整体效率。

S_s^{SOC} 的动态方程为：

$$S_s^{\text{SOC}}(t+1) = S_s^{\text{SOC}}(t) + (\eta_{\text{ch}} P_{\text{ch},s}(t) - \frac{P_{\text{dis},s}(t)}{\eta_{\text{dis}}}) \cdot \frac{\Delta t}{E_s^{\text{rated}}} \quad (18)$$

式中 E_s^{rated} 为自放电率。

S_s^{SOC} 的约束条件为：

$$S_s^{\text{SOC}, \min} \leq S_s^{\text{SOC}}(t) \leq S_s^{\text{SOC}, \max} \quad (19)$$

式中 $S_s^{\text{SOC}, \max}$ 、 $S_s^{\text{SOC}, \min}$ 分别为 $S_s^{\text{SOC}}(t)$ 的最大值与最小值。

充放电互斥条件为：

$$\begin{aligned} 0 \leq P_{\text{ch},s}(t) \leq M \cdot u_s(t), \\ 0 \leq P_{\text{dis},s}(t) \leq M \cdot (1 - u_s(t)) \end{aligned} \quad (20)$$

式中： $u_s(t) \in \{0, 1\}$ 为充电状态标志； M 为大常数。

2.2.2 热力系统约束

综合能源系统中，热力系统的约束主要来源于热源，包括热电联产 (CHP) 设备、燃气锅炉和燃气机组余热等，其他约束有用户负荷以及管道运输约束。热力网络平衡约束考虑了管道传输延迟和热损失，确保热源出力、管网传输与用户负荷的动态匹配，同时限制节点温度在安全范围内。

热网节点能量平衡约束保证热网节点流入与流出热量的平衡，从而维持系统热源与负荷之间的供需平衡。

$$\sum_{j \in N_i} Q_{ji}(t - \tau_{ji}) + Q_{\text{gen},i}(t) = Q_{\text{load},i}(t) + \sum_{k \in N_i} Q_{ik}(t) \quad (21)$$

式中： $Q_{\text{gen},i}(t)$ 为节点 i 的热源出力； $Q_{\text{load},i}(t)$ 为节点 i 在 t 时刻的负荷； τ_{ji} 为热流从节点 j 到 i 的传输时延，min。

热源出力限制和管道热流限制保证了热源和管道在安全条件下稳定运行。

$$Q_{\text{gen},i}^{\min} \leq Q_{\text{gen},i}(t) \leq Q_{\text{gen},i}^{\max} \quad (22)$$

$$|Q_{ij}(t)| \leq Q_{ij}^{\max}, \forall t, \forall (i, j) \in \zeta_{\text{heat}} \quad (23)$$

2.2.3 气网系统约束

天然气网络的气源一部分来自电解水后的氢气与二氧化碳反应所生产的甲烷，一部分来自天然气供应，约束条件除了来自气源外，更主要的是来自管道网络和气压。天然气网络平衡约束通过气压-流量方程保证气源供应、管道传输与负荷需求的实时匹配，避免气压越限导致设备损坏或供气中断。

节点流量平衡约束保证了气网节点在流入流出量上的平衡，保证了气网的供需平衡和稳定运行。

$$\sum_{j \in N_i} F_{ji}(t) + F_{\text{injection},i}(t) = F_{\text{load},i}(t) + \sum_{k \in N_i} F_{ik}(t) \quad (24)$$

式中： $F_{ji}(t)$ 为 t 时刻流入气流量； $F_{\text{injection},i}(t)$ 为节点 i 的气源注入量； $F_{\text{load},i}(t)$ 为节点 i 的燃气负荷。

为了保证气网管道流量与气压在一个合适的关系范围，建立气压流量关系 (Weymouth 方程) 约束如下。

$$F_{ij}(t) = K_{ij} \cdot \text{sign}(p_i(t) - p_j(t)) \cdot \sqrt{|p_i^2(t) - p_j^2(t)|} \quad (25)$$

式中： $p_i(t)$ 为节点 i 的气压，kPa； K_{ij} 为管道特性常数； $\text{sign}(\cdot)$ 为取正函数。

3) 气压安全范围

$$p_i^{\min} \leq p_i(t) \leq p_i^{\max}, \forall t, \forall i \in N_{\text{gas}} \quad (26)$$

式中： $p_i^{\max}$ 、 $p_i^{\min}$ 分别为节点 i 最大和最小气压值； N_{gas} 为气网节点数量； N_{gas} 为气网正常工作状态集合。

2.2.4 跨能源耦合约束

除了各能源网络内部的运行约束外，能源网络

之间的耦合约束是本文研究的核心内容。本文构建了电热气耦合矩阵,旨在精确描述各能源之间的耦合关系。各能源之间的碳流交互通过设备耦合关系得以体现,因此,本文进一步建立了以下设备耦合约束,以推动系统的低碳优化调度。其中,CHP机组的电热耦合约束与P2G的能源转换约束,是实现电-热-气系统协同降碳的关键因素。

1) CHP设备耦合约束

CHP机组的多能联供特性通过电热耦合方程进行描述,同时依据效率参数来分配碳排放责任。具体的电热耦合关系如下所示。

$$Q_{\text{CHP}}(t) = \eta_h \cdot P_{\text{CHP}}(t), P_{\text{CHP}}^{\min} \leq P_{\text{CHP}}(t) \leq P_{\text{CHP}}^{\max} \quad (27)$$

式中 $P_{\text{CHP}}^{\max}$ 、 $P_{\text{CHP}}^{\min}$ 分别为 CHP 设备功率输出下限和 CHP 设备功率输出上限。

碳排放分配关系如式(5)~(6)所示。

2) 电转气(P2G)约束

电转气设备约束通过效率模型量化电力-燃气转换关系,其碳排放因子可根据是否集成碳捕集技术动态调整。

$$F_{\text{P2G}}(t) = \eta_{\text{P2G}} \cdot \frac{P_{\text{P2G}}(t)}{V_{\text{gas}}^{\text{LH}}}, 0 \leq P_{\text{P2G}}(t) \leq P_{\text{P2G}}^{\max} \quad (28)$$

式中: $V_{\text{gas}}^{\text{LH}}$ 为天然气低热值, kWh/m^3 , 典型值约为 $10 \text{ kWh}/\text{m}^3$; $F_{\text{P2G}}(t)$ 为生产的天然气流量, m^3/h ; $P_{\text{P2G}}^{\max}$ 为 P2G 设备工作时最大电功率。

2.2.5 碳强度约束

TV-NCI 阈值约束强制节点碳强度 $C_i^{\text{TV-NCI}}(t_k)$ 不超过政策允许值 $C_i^{\text{TV-NCI}, \max}$ 。

$$C_i^{\text{TV-NCI}}(t_k) \leq C_i^{\text{TV-NCI}, \max}, \forall t, \forall i \in N_{\text{critical}} \quad (29)$$

式中 N_{critical} 为系统节点集合。

3 算例分析

本文以 IEEE 33 节点扩展电-热-气耦合系统为例,验证了所提出的 TV-NCI 和 CFBC 在降低碳排放和识别高碳节点方面的效果,并基于此系统进一步验证了基于 TV-NCI 和 CFBC 的调度策略的优势。本文所采用的设备参数如下:光伏额定容量为 200 kW,风电额定容量为 150 kW,柴油发电机组额定容量为 200 kW,负荷范围在 15%~85%,碳排放因子为 $650 \text{ gCO}_2/\text{kWh}$; CHP 机组(电效率 40%,热效率 50%), P2G 设备(转换效率 60%)。本文选择的仿真平台为 MATLAB/Simulink+YALMIP,并使用 GLPK 求解器进行求解。

3.1 多能流系统碳流指标

本文所提出的 TV-NCI 描述了碳强度的时变特性,CFBC 帮助识别综合能源系统中的高碳节点,为证明两个指标在综合能源系统低碳策略上的有效性,本文设置以下两个场景进行验证。

场景 1: TV-NCI 显示降碳效果。

场景 2: CFBC 识别高碳节点和线路。

1) TV-NCI 显示降碳效果

根据本文提出的 TV-NCI 定义及更新机制,在 IEEE 33 节点系统上的节点 5 进行计算,由图 4 可知,07:00 以前光伏机组未出力时,节点的碳强度未受影响,保持不变;07:00 以后光伏机组开始输出功率,节点碳强度受到影响开始下降,直到光伏机组出力超过负荷,节点碳强度接近 0;18:00 以后光伏机组出力下降,随之节点碳强度开始上升,直到回归起始值。

TV-NCI 会受到光伏出力的影响,跟固定 NCI 相比能够更科学的显示节点的碳强度,为系统的低碳调度提供了更优质的工具。

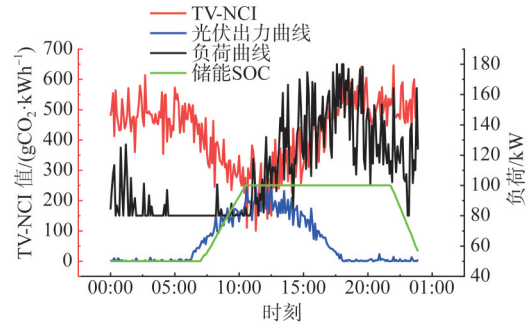


图4 节点5的时变碳强度变化曲线

Fig. 4 Time-varying carbon intensities curves of node 5

2) CFBC高碳识别

图5是对 IEEE 33 节点电力系计算节点和线路 CFBC 的结果,由图 5 可知,节点 4、7、21、32 是 CFBC 值最高的几个节点,编号为 E2-4、E4-5、E14-15、E25-26 的线路是 CFBC 值最高的几条线路。

对 CFBC 排名最高的几个节点进行阻断实验(接入新能源机组),系统碳排放和新能源消纳率均显著改善,改善结果如表 1 所示。由于系统拓扑结构导致的消纳空间不足,以及新能源机组接入节点规划不当,导致在新能源机组出力高峰时电能过剩,阻断前弃电率较高。经过阻断实验,系统弃电

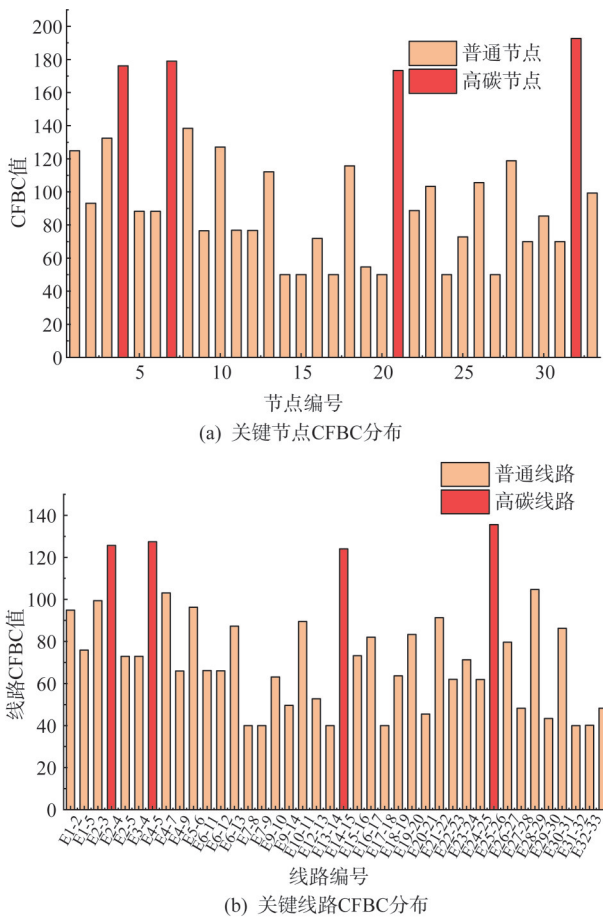


图 5 电力系统节点与线路 CFBC 计算结果

Fig. 5 Calculation results of CFBC for power system nodes and lines

率降低了 34.2 %，平均降碳率也大幅提升，碳排放量显著下降，新能源利用率同样得到提高。这一结果验证了高 CFBC 节点在控制碳传播路径中的重要作用。

表 1 高碳节点阻断实验效果

指标变化	平均弃电率/%	平均降碳率/%	碳排放总量/(kg CO ₂ · d ⁻¹)	新能源利用率/%
阻断前	18.7	15.2	1 850	81.3
阻断后	12.3	28.7	1320	87.7
变化率/%	-34.2	88.8	0	7.9

将 CFBC 指标同样应用于热力网络和天然气网络，计算结果如图 6 所示：在热能网络中，节点 4 连接碳排放较高的燃气锅炉，并通过 CHP 设备与电力网络连接，计算结果显示其 CFBC 值最高，为碳流路径中的最关键的节点；天然气网络中节点 5 连

接碳排放较高的燃气轮机，并通过 P2G 设备与电力网络连接，因此其 CFBC 值最高，为碳流路径中的枢纽节点。同理，在能源网络拓扑结构影响下，与高碳节点相连的线路其 CFBC 值也相对较高，如热能网络中的 H3-4、H4-5 和天然气网络中的 G5-6。

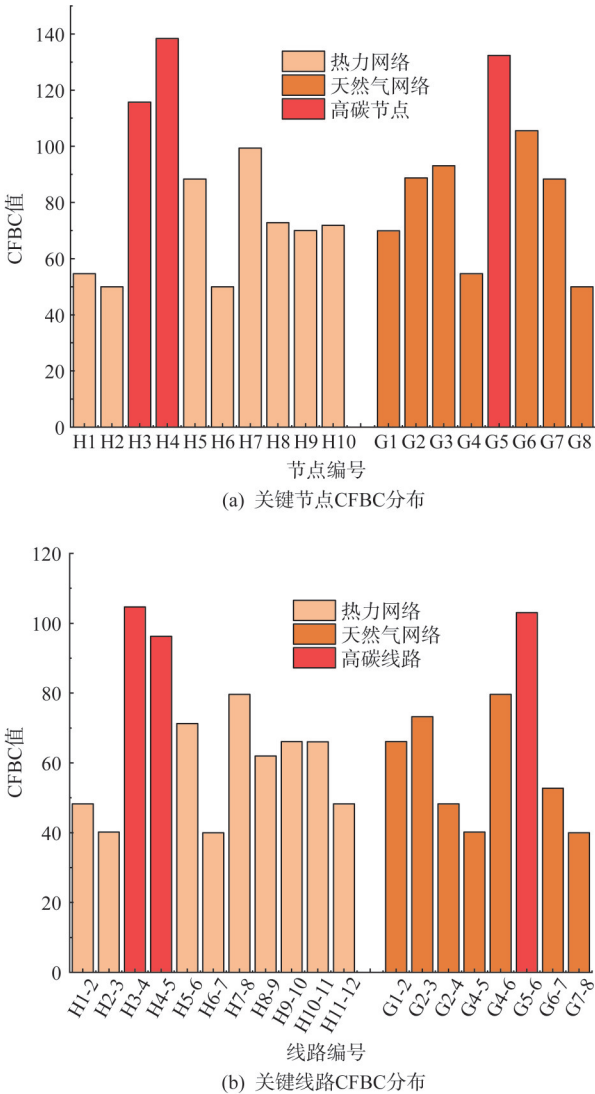


图 6 热力网络与天然气网络节点与线路 CFBC 计算结果

Fig. 6 CFBC calculation results for nodes and lines in thermal and natural gas networks

上述实验验证了 TV-NCI 指标在体现碳排放动态效果方面的有效性。在优化调度计算中引入该指标，能够使控制策略的时间颗粒度更加精细。在对电力系统、热力网络和天然气网络的节点及线路进行 CFBC 计算时，结果精准地捕捉了能源网络中的碳流枢纽节点及线路。通过在枢纽节点及线路规划碳排放更低的机组或新能源机组，能够有效降低综

合能源系统的碳排放。这一指标为新能源机组的规划提供了新的方案。

3.2 综合能源系统低碳调度

为了验证将本文所提出的时变节点碳强度(TV-NCI)用于目标函数应用于综合能源系统进行低碳优化调度的优势,本文基于IEEE 33节点扩展电-热-气耦合系统(E33-H12-G8),如图1所示,考虑12节点环形热网,包含燃气锅炉(热效率为85%,碳强度为200 gCO₂/kWh)、CHP机组(电效率为40%,热效率为50%,碳强度为200 gCO₂/kWh);8节点气网,含气源、P2G设备(转换效率为60%,电网碳强度为500 gCO₂/kWh,进行低碳优化调度,设置了3个场景进行对比验证实验。

场景1:传统经济调度。

场景2:固定NCI调度。

场景3:本文所提方法:TV-NCI+经济调度。

1) 不同场景调度结果分析

为了进一步分析本文所提指标在综合能源系统上低碳优化调度的有效性,对3种场景进行了对比试验,关键节点的碳排放情况如表2所示。

表2 关键节点在不同调度下的碳排放强度
Tab. 2 Carbon emissions of key nodes under different

节点	时段	schedules			gCO ₂ /kWh
		场景1	场景2	场景3	
E4	6—17	250.77	184.32	145.92	
E7	20—22	259.58	187.95	151.02	
E21	12—14	281.20	238.66	209.21	
E32	18—20	321.18	254.33	177.23	
H3	0—6	582.27	442.09	322.61	
H4	8—20	422.10	495.22	550.52	
G5	12—18	1 252.06	937.45	760.43	

在本文所述的调度方法下,典型日6—17时段,由于光伏发电量增加,高碳机组出力减少,导致电网节点4的碳排放显著下降;20—22时段,负荷转移至P2G气体生产,使得电网节点7的碳排放得到有效降低;12—14时段,电网节点21的光伏出力增加,储能介入调度,最终碳排放显著下降,但储能调度也导致了调度成本的上升;18—20时段,由于燃气机组出力减少,风电提供补偿,电网节点32的碳排放显著降低;0—6时段,燃气锅炉使用量减少,CHP机组在供热高峰时段增加出力,占比超过70%,使得气网节点3、4的碳排放大幅

下降;12—18时段,气网主气源依赖度降低,P2G产气量增加,气网节点5的碳排放显著下降。

在调度过程中,除了储能因素导致调度成本增加外,为了最大化风电消纳,调度模型中设置了弃风惩罚项,这一措施同样引发了成本上升。此外,电解水制氢和甲烷化过程中存在能量梯级损耗,导致电能转换效率降低,因此需要额外输入更多可再生能源以满足负荷需求,这也间接增加了调度成本。

为了清晰地展示本文方法在调度综合能源系统时的低碳性与经济性表现,本文分别在3种场景下进行了传统经济性调度、固定NCI调度以及本文方法下的调度实验。图7结果显示,相较于传统经济性调度和固定NCI调度,本文方法调度下的综合能源系统总体碳排放分别降低了24.79%和19.22%,同时运行总成本分别上升了19.43%和7.14%,新能源消纳率则分别提高了12.8%和4.4%。由此可见,本文方法在显著减少碳排放、提升新能源消纳率的同时,总体运行成本的增加幅度明显减小,有效满足了综合能源系统低碳经济调度的需求。

为了直观展示本文方法的优越性,本文计算了3种方法的帕累托前沿数据。帕累托前沿是多目标优化中的核心概念,它表示在碳排放和成本两个目标之间无法进一步优化的边界。图8前沿上的每个点代表一个最优解,包括经济成本最低的最优解、碳排放最低的最优解以及均衡解。从图8可以看出,传统调度方法的成本最低,但碳排放较高;固定NCI调度方法通过固定碳强度约束实现减排,但由于未进行动态优化,导致成本较高;而本文方法在相同碳排放水平下成本最低,或在相同成本水平下碳排放最低,最接近最优解区域,充分体现了动态优化的优势。

4 结论

本文针对传统碳核算方法存在的碳排放责任不明确、关键节点难以识别等问题,以及无法支持系统动态优化和多能流耦合系统动态碳管理中面临的跨能源碳排放追踪困难、动态模型复杂度高等挑战,从提升综合能源系统低碳经济调度的有效性出发,充分考虑碳流变化的时效性,提出了一种基于时变指标的低碳经济调度策略,并构建了衡量节点碳强度和碳流传播路径的指标体系。通过对IEEE

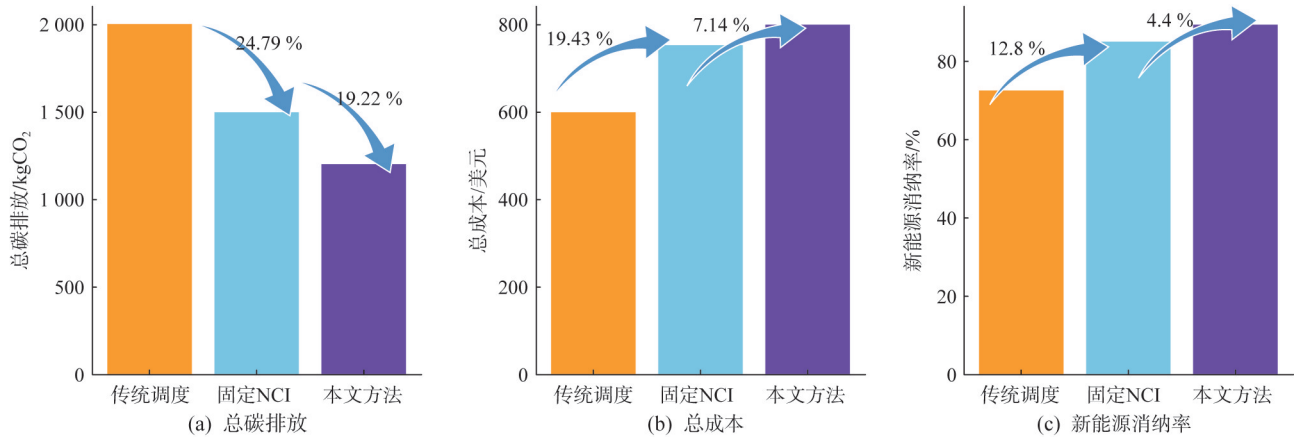


图 7 3种方法调度结果对比

Fig. 7 Comparison of three scheduling methods for scheduling results

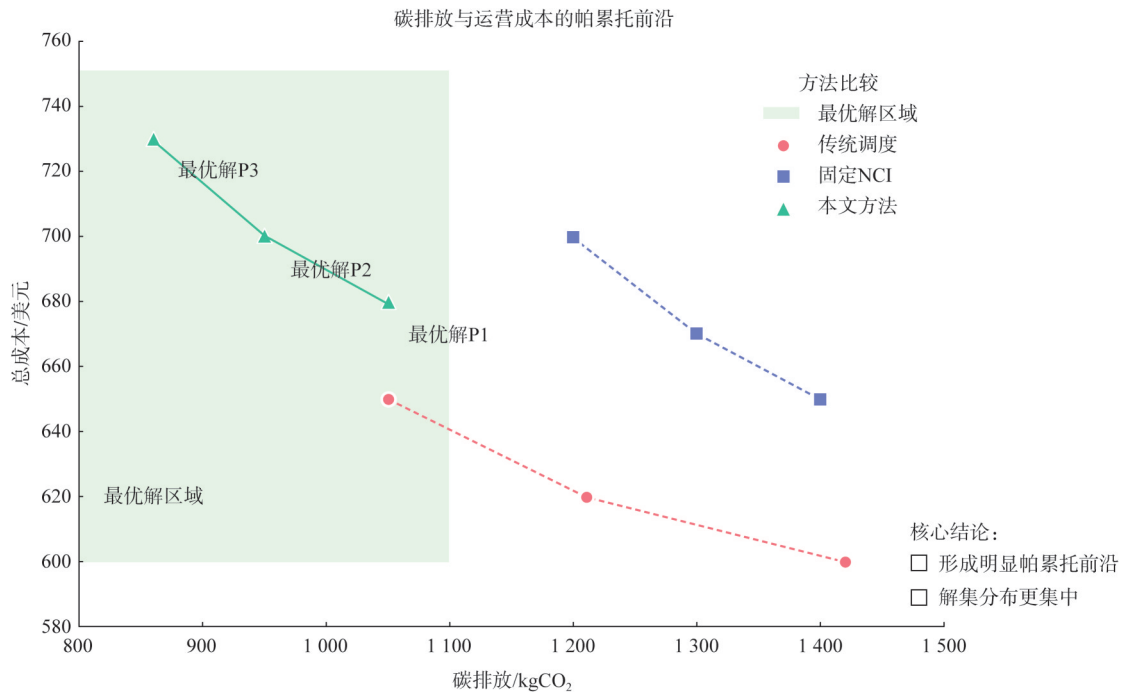


图 8 3种方法帕累托前沿数据

Fig. 8 Three methods for pareto front data

33节点系统及其拓展的综合能源系统进行算例研究,验证了本文所提出的方法和指标的有效性,得出结论如下。

1)相较于传统固定节点碳强度(NCI),本文提出的时变节点碳强度(TV-NCI)能在分钟级时间尺度上进行更新,展示了新能源机组对碳流变化的影响,为电力系统低碳调度和规划提供了更准确的评价指标。

2)提出的碳流介数中心性(CFBC)通过计算碳流最短流动路径及其经过的节点和线路,展示了网

架结构对碳流传播路径的影响,能够应用于电力系统中识别高碳节点和线路,为电网低碳规划提供了新的考量指标。

3)以本文提出的时变节点碳强度和经济性指标为目标函数的模型,通过细化节点碳强度时间变化颗粒度,增强了碳流变化对综合能源系统低碳调度的影响。相较于固定NCI调度模型,本文方法在降低碳排放 24.79 % 的同时,调度成本仅增加 19.43 %;而在降低综合能源系统 19.22 % 碳排放的同时,运营成本仅增加 7.14 %,成本涨幅显著

减小,提升了综合能源系统低碳经济调度的有效性。

参考文献

- [1] 廖宗毅, 万文略, 陈曦. 考虑价格引导机制的园区综合能源系统日前优化调度方法[J]. 南方电网技术, 2021, 15(9): 53–60.
LIAO Zongyi, WAN Wenlue, CHEN Xi. Day-ahead optimal scheduling method of park integrated energy system considering price guidance mechanism [J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(9): 53–60.
- [2] FAN Wei, JU Liwei, TAN Zhongfu, et al. Two-stage distributionally robust optimization model of integrated energy system group considering energy sharing and carbon transfer [J]. Applied Energy, 2023(331): 120426.1–120426.13.
- [3] 张儒峰, 姜涛, 李国庆, 等. 考虑电转气消纳风电的电-气综合能源系统双层优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(19): 5668–5678.
ZHANG Rufeng, JIANG Tao, LI Guoqing, et al. Dual-layer optimal scheduling of electricity-gas integrated energy system considering power-to-gas consumption and wind power [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(19): 5668–5678.
- [4] 税月, 刘俊勇, 高红均, 等. 考虑风电不确定性的电热综合系统分布鲁棒协调优化调度模型[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(24): 7235–7247.
SHUI Yue, LIU Junyong, GAO Hongjun, et al. Coordinated and optimized scheduling model of electric heating integrated system considering wind power uncertainty [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(24): 7235–7247.
- [5] 林楷东, 陈泽兴, 张勇军, 等. 含P2G的电-气互联网络风电消纳与逐次线性低碳经济调度[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(21): 23–33.
LIN Kaidong, CHEN Zexing, ZHANG Yongjun, et al. Wind power consumption and linear low-carbon economic scheduling of electricity-gas interconnection network with P2G [J]. Automation of Power Systems, 2019, 43(21): 23–33.
- [6] 张宁, 李姚旺, 黄俊辉, 等. 电力系统全环节碳计量方法与碳表系统[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(9): 1–12.
ZHANG Ning, LI Yaowang, HUANG Junhui, et al. Carbon measurement method and carbon meter system of the whole link of power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(9): 1–12.
- [7] 杨毅, 易文飞, 王晨清, 等. 基于碳流追踪的电力系统源网荷低碳经济调度[J]. 电力建设, 2023, 44(5): 108–119.
YANG Yi, YI Wenfei, WANG Chenqing, et al. Low-carbon economic scheduling of power system source-grid-load based on carbon flow tracking [J]. Electric Power Construction, 2023, 44(5): 108–119.
- [8] 刘可真, 李林耘, 林铮, 等. 考虑碳排放流的电-气互联系统源荷互动低碳经济调度[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(5): 1–10.
LIU Kezhen, LI Linyun, LIN Zheng, et al. Low-carbon economic scheduling of power-to-gas interconnection system considering carbon emission flow [J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(5): 1–10.
- [9] LI Jifeng, HE Xingtang, LI Weidong, et al. Low-carbon optimal learning scheduling of the power system based on carbon capture system and carbon emission flow theory [J]. Electric Power Systems Research, 2023 (218): 109215.1–109215.12.
- [10] LIU Zheyuan, XING Haujun, LUO Yangfan, et al. Low-carbon economic dispatch of an integrated energy system based on carbon emission flow theory [J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2023, 18(3): 1613–1624.
- [11] FENG Jieran, NAN Junpei, WANG Chao, et al. Source-load coordinated low-carbon economic dispatch of electric-gas integrated energy system based on carbon emission flow theory [J]. Energies, 2022, 15(10): 36–41.
- [12] 何良策, 张逸飞, 卢志刚, 等. 考虑CCGT-P2HH-CAES与需求响应的电-热综合能源系统低碳经济调度[J]. 电力建设, 2025, 46(3): 48–59.
HE Liangce, ZHANG Yifei, LU Zhigang, et al. Low-carbon economic scheduling of integrated electrical-thermal energy system considering CCGT-P2HH-CAES and demand response [J]. Electric Power Construction, 2025, 46(3): 48–59.
- [13] 庞清仑, 刘文颖, 申自裕, 等. 基于碳排放分析的综合能源系统低碳优化调度方法[J]. 智能电网, 2022, 12(3): 82–91.
PANG Qinglun, LIU Wenying, SHEN Ziyu, et al. Low-carbon optimal scheduling method for integrated energy system based on carbon emission analysis [J]. Smart Grid, 2022, 12(3): 82–91.
- [14] ZHANG Bin, WU Xuewei, GHAS A, et al. Coordinated carbon capture systems and power-to-gas dynamic economic energy dispatch strategy for electricity-gas coupled systems considering system uncertainty: an improved soft actor-critic approach [J]. Energy, 2023(271): 126965.1–126965.14.
- [15] KANG Ligai, WANG Jinzhu, YUAN Xiaoxue, et al. Research on energy management of integrated energy system coupled with organic Rankine cycle and power to gas [J]. Energy Conversion and Management, 2023(287): 117117.1–117117.9.
- [16] LEI Yang, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Multi-objective stochastic expansion planning based on multi-dimensional correlation scenario generation method for regional integrated energy system integrated renewable energy [J]. Applied Energy, 2020(276): 115395.1–115395.8.
- [17] HU Xiao, ZHANG Heng, CHEN Dongwen, et al. Multi-objective planning for integrated energy systems considering both exergy efficiency and economy [J]. Energy, 2020(197): 117155.1–117155.15.
- [18] YANG Ting, GENG Yinan, WANG Hengyu. Dynamic energy flow optimization of electricity and hydrogen-enriched natural gas integrated energy systems [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2025(109): 1274–1285.
- [19] 张玉敏, 孙鹏凯, 吉兴全, 等. 考虑扩展碳排放流的综合能源系统低碳经济调度[J]. 电网技术, 2023, 47(8): 3174–3191.
ZHANG Yumin, SUN Pengkai, JI Xingquan, et al. Low-carbon economic scheduling of integrated energy system considering the expansion of carbon emission flow [J]. Power System Technology, 2023, 47(8): 3174–3191.
- [20] 叶华洋, 范强, 文贤馥, 等. 山区小水电站智能监测与预警技术研究与应用[J]. 电力大数据, 2024, 27(10): 64–73.
YE Huayang, FAN Qiang, WEN Xiankui, et al. Research and application of intelligent monitoring and early warning technology for small hydropower stations in mountainous areas [J]. Electric Power Big Data, 2024, 27(10): 64–73.

(下转第71页 Continued on Page 71)