

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2025.03.006

考虑碳流优化的园区综合能源系统低碳经济运行策略

郭禹辰^{1,2}, 王琦^{1,2}, 王猛^{1,2}, 王志远^{1,2}, 刘俞池^{1,2}, 陈严³

(1. 南京师范大学南瑞电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210046;

2. 江苏省综合能源设备及集成国际联合实验室, 江苏 南京 210046;

3. 国网江苏省电力有限公司南通市通州区供电分公司, 江苏 南通 226300)

摘要:在双碳目标背景下, 针对园区综合能源系统(park integrated energy system, PIES)的低碳优化已有诸多研究, 但现有研究较少从碳流层面提出提升碳效的低碳优化策略。为此, 文中基于云平台提出考虑碳流优化的 PIES 低碳经济运行策略。首先, 构建一种双层协同优化架构, 在上层云平台设计碳流优化模块, 为下层 PIES 提供优化建议, 下层系统对自身用能计划进行修正, 实现协同优化。其次, 建立负荷碳势指标测算 PIES 碳流水平, 通过云平台引导 PIES 降低负荷碳势从而提升系统碳效, 并且进一步在云平台设计考虑碳效的纳什议价模块, 以提升多主体交易中参与方的碳收益。然后, 采用目标级联分析法对双层模型进行求解。最后, 通过仿真验证考虑碳流优化的运行策略不仅可以提升综合能源系统经济收益, 还能减少碳排, 提升碳效, 同时在促进 PIES 间能源交易的过程中提高碳收益。

关键词: 园区综合能源系统(PIES); 碳流优化; 碳流理论; 目标级联分析法; 碳效; 低碳经济优化

中图分类号: TM73; TK01

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2025)03-0064-12

0 引言

实现“碳达峰, 碳中和”目标是一场意义长远、影响深刻的国家及社会系统性变革。而工业园区作为用能及碳排放大户, 其转型与技术升级对实现双碳目标至关重要^[1-2]。园区综合能源系统(park integrated energy system, PIES)作为能源耦合一体化系统, 是推动能源高效利用、降低碳排的有效解决方案^[3-7]。

随着 PIES 不断发展, 其复杂度逐渐提升, 参与主体数量持续增加。由于 PIES 涉及不同利益主体, 在优化运行中面临用户数量多、数据庞大且可能包含隐私泄露等问题^[8-10], 传统的集中式优化已无法支撑 PIES 的优化运行需求^[11]。如果采用分布式优化可以实现各主体独立计算、自行决策, 然而文献^[12]指出因为存在多个不同利益主体, 其在进行分布式优化时必然优先考虑自身发展, 忽略区域总体效益。需要考虑如何将分布式与集中式结合形成优势互补, 使 PIES 优化调度既能并行计算减轻计算压力又能集中管控统筹目标。

关于 PIES 的低碳经济优化策略的研究大多基于能源互补来提升新能源消纳率, 聚焦于挖掘能源系统的灵活性与降碳潜力, 以推进可持续发展^[13]。当前 PIES 降碳减排的方法主要包括经济性惩罚、

碳捕集、新能源消纳等^[14-16]。然而, 现有 PIES 减碳策略的主要目标均是降低整个区域内的碳排放总量, 并未考虑不同类型主体的需求。同时文献^[17]也提出虽然碳主要由源侧排放, 但碳排放根本驱动力来源于负荷侧。因此, PIES 的碳排放计量方法不应该只针对源侧, 而是需要同时考虑负荷侧碳排放责任的分摊问题^[18]。单纯追求碳排放总量降低将会抑制正常生产, 导致区域内发展不均衡, 降低优化效率。碳流作为一种新的碳排放计量方法已经在电力系统中被证明能够有效解决用户侧碳排放责任分摊问题, 能够反映系统中伴随能流的碳流情况^[14-15]。目前已有研究从碳流层面对系统进行分析, 如文献^[19]采用碳流理论, 在高碳势节点建立含有风电、水电、抽蓄、碳捕集、电转气(power to gas, P2G)的发电系统中长期机组组合模型。但该类方法都只将碳流作为客观参考指标, 无法进一步挖掘 PIES 减碳潜力。综上所述, 现有低碳优化策略聚焦于源侧碳排放的计量和优化, 未考虑负荷侧所需要承担的碳排放责任及低碳需求响应。故有必要将 PIES 碳排放责任进行合理分摊, 从能流与碳流耦合的层面对 PIES 运行进行分析优化, 激发负荷侧减排积极性, 从而提高系统单位碳排下的能源利用量, 即提升系统的碳效水平。

此外, 碳交易机制也是促进碳减排的有效手段。文献^[20-21]分析了将 PIES 引入碳交易市场的可行性, 并提出阶梯式碳交易机制来引导 PIES 控

收稿日期: 2024-11-11; 修回日期: 2025-01-20

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目(BK20240593)

制碳排放。文献[22]在 PIES 参与碳交易市场的背景下构建多供能主体奖惩规则,并基于纳什均衡建立碳交易机制下均衡竞价模型。而在多用能主体间相互交易的市场背景下,随着 PIES 新能源比重提升,低碳优化需求日益增长,在多能主体交易的市场环境下,碳交易机制需要结合各参与方的碳效水平来强化利益驱动,通过交易机制的设计激励各主体扩大碳收益,提升碳减排积极性。

综上,文中设计一种基于综合能源服务商云平台的 PIES 双层优化架构,并基于碳流理论提出负荷碳势指标,以实现 PIES 更合理高效的低碳经济优化,同时促进 PIES 主体间的高效能源交易。文中的主要创新点如下:

(1) 构建基于云平台的 PIES 双层优化架构。通过将区域低碳经济协同优化目标模型分解为低碳优化模型和经济效益最大化模型,分别由上层云平台中心及下层园区求取目标子模型最优解,并采用目标级联分析法(analytical target cascading, ATC)实现上下层间的云边协同交互,达到区域低碳经济协同优化目的。

(2) 针对 PIES 设计负荷碳势指标。基于电力系统碳流理论,将 PIES 碳排放与负荷相关联评估碳效水平,对负荷碳势进行主动优化并合理分摊碳排放责任。在综合能源服务商云平台中配置碳流优化模块,有效提升服务范围内的碳减排效率。

(3) 设计考虑负荷碳势的纳什议价模型。在构建纳什议价模型时,引入基于参与方碳效水平的效益权重设计,从而扩大 PIES 碳收益,从交易机制层面推进低碳优化进程。通过在云平台中配置纳什议价模块,促进主体间能源交易,实现公平高效的收益再分配。

1 基于综合能源服务商云平台的 PIES 双层优化架构

从 PIES 发展需求来看,越来越多的主体寻求一个能够聚集各种服务的“平台”,以获取方便快捷、统一标准的信息化服务^[23-24];另一方面,综合能源服务商需要有更好的安全性和可控性^[25],以确保服务对象的隐私安全。

在上述需求推动下,部分综合能源服务商已尝试借助科技企业的云技术搭建云服务平台^[26]。但目前云平台产品仅承担物业管理职能,业务范围也仅限于越限报警、设备报修以及能耗统计与展示,尚未针对 PIES 积极响应双碳目标的需求^[27]。

文中考虑基于服务商云平台设计一种集中-分

布式双层优化架构,旨在对服务范围内 PIES 进行低碳经济优化。上层云平台通过诊断具体能耗和碳排放问题,为下层 PIES 提供用能建议,引导其实现减排提效。云平台仅通过关键指标生成诊断报告和用能建议,不直接处理下层隐私数据,既降低了优化复杂度又确保了数据安全。文中通过云服务平台碳流优化模块重点对 PIES 的碳效指标进行优化,同时通过纳什议价模块辅助促进主体间的交易行为。对于运行过程中出现的网络阻塞或能源质量下降问题,亦可通过上层云平台的潮流监管及质量监管模块解决,文中不进行讨论。下层各 PIES 作为独立利益主体,通过自主运算和决策进行分布式优化。下层主体在得出决策后不立即执行,而是在接受上层优化建议后继续对运行策略进行修正,最终在上层的修正及引导下得到既符合自身发展需要又兼顾减排目标的低碳经济最优策略。

在具体部署中,为实现双层模型的有效运算及处理,选择使用分布式虚拟源控制器(virtual source controller, VSC)进行实部署和虚部署。对于条件允许的 PIES,其运营规模支持其拥有独立的运算决策能力,则分布式 VSC 将以实部署的方式直接部署于 PIES 内部;而对于运算能力不足的小型 PIES,上层云平台可以提供虚拟计算空间租赁服务,此时 VSC 将虚部署于平台侧,仅向 PIES 发送计算结果及决策建议,由此实现双层架构的层间交互。文中基于云平台设计的双层优化模型可以随时接受下层 PIES 的加入,适用面广,监管范围大,能够挖掘双层系统的可拓展性。PIES 双层优化架构如图 1 所示,其中 N 为区域内 PIES 的集合;PIES 1 和 PIES 2 的 VSC 为实部署;PIES N 的 VSC 为虚部署。

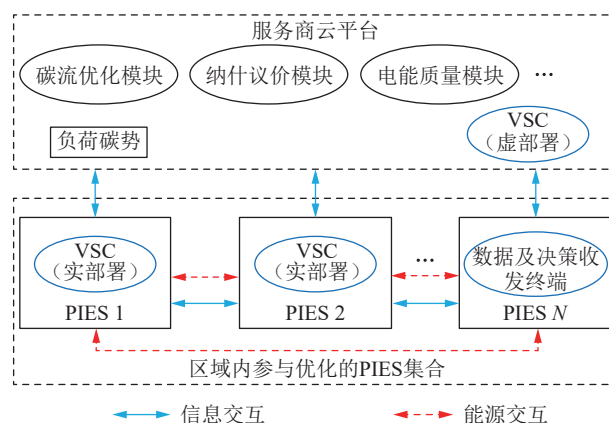


图 1 PIES 双层优化架构模型
Fig.1 A two-layer optimization architecture model of PIES

2 PIES 碳流优化

PIES 的碳排放量主要来源于能源供给侧,部分

由系统内部耦合设备产生,而碳排放的根本驱动力则来自于负荷侧需求^[14-15]。因此,准确量化并合理归算系统碳排放责任对于PIES减碳优化至关重要。

碳流是一种耦合于能量流的虚拟网络流^[16],用来量化及描述系统中不同节点以及支路碳排放的分布情况,因此可以用其来计算能源在生产、传输以及转换过程中的碳排放量,进而达到优化碳排,提升碳效的目的。目前,电力系统的碳流理论已较为成熟^[28],能够根据已知潮流分布计算出各时段PIES任意位置的碳流。碳流计算过程中的关键指标参数如下^[29]:

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

$$\rho = \frac{R}{P} \quad (2)$$

$$e_n = \frac{\sum_{k=1}^l P_{k,n} \rho_{k,n} + P_{Gn} e_{Gn}}{\sum_{k=1}^l P_{k,n} + P_{Gn}} \quad (3)$$

式中: R 为碳流率; F_{cef} 为潮流所对应的碳排放量; t 为时间; ρ 为碳流密度; P 为潮流支路对应的有功潮流; e_n 为节点 n 的碳势; $P_{k,n}$ 为第 k 条支路注入节点 n 的功率; P_{Gn} 为节点 n 的发电机输出功率; e_{Gn} 为节点 n 发电机注入碳势; $\rho_{k,n}$ 为第 k 条支路注入节点 n 的支路碳流密度; l 为向该节点注入功率的支路数量。

上述指标已经被应用于电力系统碳流分析,且基于节点碳势的电力系统优化策略也验证了碳流优化方法的有效性^[15-16]。鉴于现有PIES减碳策略均以碳排放总量作为优化指标,为此文中将碳流优化策略进一步拓展至电-气-热多源系统,基于碳流理论构建PIES扩展碳流模型,并根据节点碳势概念建立PIES的碳流指标并进行优化,旨在通过提高碳效实现根本性的低碳优化。

考虑到热力及天然气系统同样存在支路-节点的能流形式,文中基于电力系统已有碳流模型,构建用于PIES的扩展碳流模型,以表征电-气-热不同系统中的能流-碳流关系^[30-31]。PIES在能源转换的过程中伴随着不同能源系统间碳流的转移,故能源耦合设备的碳流分析成为系统优化的关键。基于此,文中根据碳流理论中节点碳势概念,提出一种适用于PIES的碳流优化指标模型,即PIES用能终端的负荷碳势。针对碳流进行优化,降低PIES负荷单位能量消耗所对应的等效碳排放量,从而达到提高碳效,降低碳排的效果。PIES负荷碳势数学模

型如下:

$$e_i(t) = \frac{\sum_{m \in P} F_{\text{buy}} P_{\text{buy},m}(t) + \sum_{d \in D} F_{\text{dev}} P_{\text{dev},d}(t)}{\sum_{m \in P} P_{\text{Load},m}(t)} \quad (4)$$

式中: $e_i(t)$ 为在 t 时段内第 i 个PIES的负荷碳势; F_{buy} 、 F_{dev} 分别为购入能源及PIES耦合能源的等效碳排放因子; $P_{\text{buy},m}(t)$ 为在 t 时段内园区第 m 种能源的购入量; $P_{\text{dev},d}(t)$ 为在 t 时段内园区第 d 个能源耦合设备的能源转换量; $P_{\text{Load},m}(t)$ 为在 t 时段内园区的第 m 种能源负荷需求量; P 为能源种类集合; D 为园区内各能源耦合设备集合。

为提升PIES的能源转换效率,优化PIES内部能源耦合设备碳效,模型中对燃气锅炉(gas boiler, GB)和热电联产(combined heat and power, CHP)机组设置更高的碳排放权重。

负荷碳势表征用能主体消耗单位能量所造成的等效系统碳排,根据比例分摊原则^[32],碳排放责任从能源生产侧向用能侧进行细化分配。区别于其他通过抑制PIES碳排放总量增加园区减碳压力的低碳优化策略,文中提出的碳流优化方法考虑了PIES的用能需要,使终端用能成为驱动园区减碳的动力来源。

3 低碳经济双层优化运行模型建立及求解

根据第1章设计的双层优化架构,上层云平台通过碳流优化模块计算下层各园区用能终端的负荷碳势,并以碳势指标为依据向下层PIES提出运行建议;下层各园区根据自身发展需要计算经济成本,同时结合上层的用能建议进行分布式优化。通过ATC进行云边协同交互,实现上层用能建议与下层运行决策的耦合。

3.1 PIES架构模型

系统通过上级电网和气网购入能量,内部通过耦合设备实现能源类型转换与互联。系统内部主要设备如下。

(1) CHP 机组: 通过燃烧天然气驱动发电机发电,同时回收余热输送至锅炉,实现电-气-热三种能源的耦合利用。

(2) P2G 设备: 为细化P2G设备运行过程,并充分发挥氢能效益,将P2G分解为电解水及甲烷反应两阶段模型^[33]。文中P2G设备包括电解槽(electrolyzer, EL)及甲烷反应炉(methane reactor, MR)。该设备在能源转换同时可吸收部分二氧化碳,具有减碳效益,同时促进新能源消纳。

(3) 氢燃料电池 (hydrogen fuel cell, HFC): 将 EL 产生的氢气转化为电能和热能, 实现氢-电-热多能耦合。

(4) GB: 通过燃烧天然气加热供水, 为负荷提供热能, 是气-热能源间的耦合设备。

3.2 约束条件

PIES 模型中约束条件可分为设备约束和功率平衡约束两类。其中, 设备约束可以分为风电出力约束、储能设备约束以及能源耦合设备运行约束; 功率平衡约束根据 PIES 用能构成分为电能、天然气、热能以及氢能平衡约束。考虑到电-气-热-氢储能设备在工作原理和运行目的上十分相似, 文中采用统一的储能设备建模方法。具体数学模型及约束条件可参考文献[12,15]。

3.3 通过 ATC 实现云边协同交互

实现文中所提云平台双层优化架构中上、下层间的高效交互, 是保障园区低碳经济协同优化的关键问题。文中采用基于 VSC 的云边协同交互架构, 通过 ATC 实现上、下层协同优化, 同时兼顾 PIES 经济运行与碳流优化目标。

ATC 作为一种基于并行计算的复杂系统设计方法, 其核心思想是将系统目标拆分成上、下两级, 文中所设计用于 PIES 低碳经济优化的 ATC 结构如图 2 所示, 各级所负责的目标问题独立求解, 并将决策变量进行级间传递, PIES 根据收到的变量进一步改变自身决策, 如此往复迭代, 交叠优化, 直到满足收敛条件为止。层间决策变量为 PIES 电、气购入量, 从而实现用能引导效果。

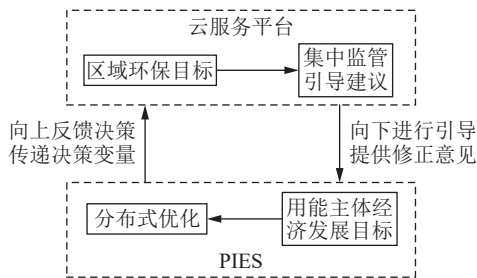


图 2 ATC 结构

Fig.2 ATC structure

针对低碳经济优化目标, 构造增广拉格朗日函数, 将其分解为两个子问题进行迭代求解。子目标模型中的增广拉格朗日罚函数项能够在迭代过程中使上层目标与下层实际运行结果差距缩小, 当残差小于层间阈值时, 即可判定获得全局最优解, 迭代停止并输出最优运行策略。

(1) 下层优化目标。

在双层优化模型中, 下层园区根据自身发展需

要, 以最小化经济成本作为优化目标独立求解, 包括购入电能成本和天然气成本, 同时接收来自上层的数据监管及用能建议, 并做出相应的决策调整。具体目标函数如下:

$$\min F_{\text{IES}}(t) = \sum_{t=1}^{24} C_e^{\text{buy}}(t) P_e^{\text{buy}}(t) + \sum_{t=1}^{24} C_g^{\text{buy}}(t) \times P_g^{\text{buy}}(t) + \omega_1(t) \left\| P_e^{\text{buy}}(t) + P_g^{\text{buy}}(t) - f_1(t) \right\|_2^2 \quad (5)$$

$$f_1(t) = \arg \min E(t) (P_e^{\text{buy}}(t-1) + P_g^{\text{buy}}(t-1)) \quad (6)$$

$$\omega_1(t) = \omega_1(t-1) + \left[\arg \min E(t) (P_e^{\text{buy}}(t-1) + P_g^{\text{buy}}(t-1)) - \arg \min F_{\text{IES}}(t) (P_e^{\text{buy}}(t-1) + P_g^{\text{buy}}(t-1)) \right]^2 \quad (7)$$

式中: $F_{\text{IES}}(t)$ 为 t 时段内下层 PIES 运行经济成本; $C_e^{\text{buy}}(t)$ 、 $C_g^{\text{buy}}(t)$ 分别为上级能源系统在 t 时段内的电能及天然气价格; $P_e^{\text{buy}}(t)$ 、 $P_g^{\text{buy}}(t)$ 分别为 PIES 在 t 时段内向上级能源系统购入的电量及天然气量; $f_1(t)$ 为上层向下层反馈的决策变量偏差量; $E(t)$ 为 t 时段内 PIES 运行碳排放量; $\omega_1(t)$ 为下层偏差惩罚因子, 用以加速目标函数值收敛。

(2) 上层优化目标。

上层模型以 PIES 低碳优化为目标, 主要体现在对文中所提出的负荷碳势指标进行碳流优化。由于减碳目标需要减少不可再生能源的利用并提高新能源利用率, 因此将向上级购入电能及弃风量也纳入了低碳优化范围。具体目标函数如下:

$$\min E(t) = \sum_{t=1}^{24} C_e^{\text{buy}}(t) P_e^{\text{buy}}(t) + k_1 \sum_{t=1}^{24} \sum_{i \in N} e_i(t) + k_2 \sum_{t=1}^{24} \sum_{i \in N} (P_{\text{DG},i}^{\text{max}}(t) - P_{\text{DG},i}(t)) + \omega_2(t) \left\| P_e^{\text{buy}}(t) + P_g^{\text{buy}}(t) - f_2(t) \right\|_2^2 \quad (8)$$

$$f_2(t) = \arg \min F_{\text{IES}}(t) (P_e^{\text{buy}}(t-1) + P_g^{\text{buy}}(t-1)) \quad (9)$$

$$\omega_2(t) = \omega_2(t-1) + \left[\arg \min E(t) (P_e^{\text{buy}}(t-1) + P_g^{\text{buy}}(t-1)) - \arg \min F_{\text{IES}}(t) (P_e^{\text{buy}}(t-1) + P_g^{\text{buy}}(t-1)) \right]^2 \quad (10)$$

式中: $P_{\text{DG},i}^{\text{max}}(t)$ 、 $P_{\text{DG},i}(t)$ 分别为第 i 个 PIES 在 t 时段内风电的最大出力及风电的实际消纳量; $f_2(t)$ 为上层区域云平台收到的下层 PIES 用能决策偏差量; k_1 、 k_2 为常量; $\omega_2(t)$ 为上层偏差惩罚因子, 用以加速目标函数值收敛。

通过 ATC 实现的云边交互双层优化架构, 能够有效兼顾区域经济发展和碳减排需要。该架构采用并行求解方式分担计算负荷, 简化了求解过程, 同时保护了下层参与主体的隐私, 提升了区域

优化运行的稳定性和安全性。

3.4 考虑碳势指标的改进纳什议价模型

为辅助下层主体间的交易行为并进一步提升新能源利用率,考虑在云平台内配置改进的纳什议价模块,促进服务区域内供需信息互通,撮合主体间进行能源交易以提升能效、碳效以及经济效益^[34-35]。

纳什议价理论是博弈论中的重要理论,主要指参与者间通过谈判及协商的方式解决利益分配问题,最终得到最优交易策略集合。集合内任何参与者单独改变策略都不能得到收益,即达到纳什均衡^[36]。PIES间基于纳什议价的交易模型为:

$$\begin{cases} \max (U_c - U_c^0) \prod_{i=1}^K (U_i - U_i^0)^{\beta_i} \\ \text{s.t. } U_c \geq U_c^0 \\ U_i \geq U_i^0 \end{cases} \quad (11)$$

式中: U_c^0 、 U_i^0 分别为云平台和第 i 个 PIES 的谈判破裂点,一般选择交易中产生的最坏情况,即不采取合作情况下的运行结果; U_c 、 U_i 分别为云平台和第 i 个 PIES 进行交易后所获得的效益; K 为参与者集合; β_i 为交易过程中第 i 个 PIES 的效益权重。

基于纳什议价理论,PIES 服务商云平台中配置的纳什议价模块的具体模型可表示为:

$$\beta_i = a_i - b_i e_i \quad (12)$$

$$\begin{cases} \max C = \prod_{i=1}^K [P_{\text{ext},i} (C_0 - z_i)] \times \\ \prod_{i=1}^K [P_{0,i} C_0 - (P_{0,i} - x_i) + x_i y_i]^{\beta_i} \\ \text{s.t. } P_{\text{ext},i} \geq 0 \\ 0 \leq x_i \leq P_0 \\ 0 \leq y_i \leq C_0 \\ 0 \leq z_i \leq C_0 \end{cases} \quad (13)$$

式中: e_i 为第 i 个 PIES 的负荷碳势; a_i 、 b_i 为常量参数,用于 β_i 的合理取值; C 为经纳什议价后的总体效益; $P_{\text{ext},i}$ 为第 i 个 PIES 的新能源余量; C_0 为上级能源网络交易单价; z_i 为第 i 个 PIES 出售新能源的单价; $P_{0,i}$ 为第 i 个 PIES 主体参与交易前向上级网络购能量; x_i 为第 i 个 PIES 参与交易的能源量; y_i 为第 i 个 PIES 主体交易过程中的能源单价; P_0 为负荷需求量。式(13)表明纳什议价模块将推动云平台与 PIES 主体的交易达到帕累托最优。关于纳什议价模块的优化原理及运行机制,文献^[37]中已进行系统阐述。在运行结构方面,基于 PIES 服务商云平台所设计的双层架构,为园区主体提供了良好的

协商与交易平台。

结合式(12)、式(13)可以看出,文中设计的纳什议价模块结合了 PIES 主体的碳效指标。在议价模型中,纳什议价模块能够根据不同 PIES 主体的负荷碳势修正参与方效益权重 β_i ,即碳势越低、碳效越高的主体在交易中获得收益越明显。这样设计旨在提升主体在交易过程中的碳收益,从而激发 PIES 主体的减碳积极性。从交易机制层面来看,这一设计进一步强化了 PIES 低碳经济优化效果。

3.5 求解流程

PIES 双层优化模型求解流程如图 3 所示。

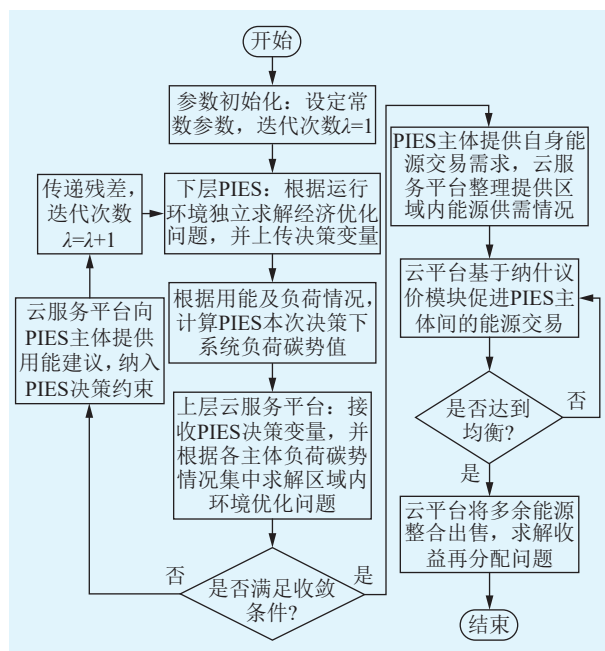


图 3 PIES 双层优化模型求解流程
Fig.3 Solving flowchart of two-layer optimization model for PIES

模型求解步骤如下。

步骤 1: 输入 PIES 不同类型能源负荷、风电最大出力以及能源价格等常数参数进行初始化。

步骤 2: 下层各 PIES 根据自身经济性目标进行分布式优化。

步骤 3: 得出经济性优化策略,并求得用能终端负荷碳势指标。下层不直接进行决策,将关键参数上传至云平台。

步骤 4: 上层云平台接收下层的参数,并根据自身的碳流优化模块对下层用能提出修正建议。

步骤 5: 下层接收到上层建议后根据要求对自身用能进行修正,并重新进行计算决策,再将修正后的决策关键参数上传至云平台。如此往复迭代,直至交互参数满足收敛条件。

步骤 6: 完成云平台下的低碳经济优化, 同时得到不同主体间能源供需关系。基于纳什议价模型对收益分配问题进行求解。

步骤 7: 得到低碳经济运行最优策略集, 输出结果。

文中构建的云平台下考虑碳流优化的 PIES 优化运行模型为混合整数非线性模型, 因此须将上述模型转化为混合整数线性模型, 采用 MATLAB 中 YALMIP 工具包调用 CPLEX 求解器进行求解。

4 算例分析

4.1 算例描述

以某含风电的典型 PIES 为例, 文中利用 MATLAB 中的 CPLEX 求解器对双层优化模型进行求解, 系统以 1 h 为步长, 24 h 为周期进行模拟仿真, 设置 3 种场景。

场景 1: 仅考虑园区生产发展需要及经济效益的 PIES 经济调度。

场景 2: 考虑碳交易, 并在云平台内部署阶梯式碳交易模块的 PIES 低碳经济调度。

场景 3: 考虑碳流优化, 并在云平台内部署负荷碳势优化模块的 PIES 低碳经济调度。

4.2 算例优化结果

3 种场景下 PIES 的每日能源购入量、经济成本、碳排放总量及日均负荷碳势如表 1 所示。

表 1 3 种场景下 PIES 运行数据
Table 1 PIES operation data in three scenarios

场景	购气量/ kW	购电量/ kW	运行 成本/元	碳排放 总量/kg	日均负荷碳势/ [tCO ₂ ·MW ⁻¹ ·h ⁻¹]
1	18 501.7	4 900.0	23 607	41 331	1.157
2	14 651.8	12 301.2	24 002	33 139	0.855
3	14 651.2	12 355.5	23 957	33 102	0.808

(1) 不考虑低碳优化的 PIES 经济优化结果。

在未使用云平台进行低碳优化, 仅根据 PIES 发展需要进行经济优化时, PIES 以经济效益最优为目标, 向上级大量购入成本较低的天然气满足所有负荷用能需求。这种模式下, 内部能源耦合设备处于高强度运行状态, 但完全忽略了 GB、CHP 等设备运行过程中产生的大量碳排放问题。同时, 弱化需求响应也导致了 PIES 内部能源耦合成本提高, 既对环境造成相当的破坏, 还对设备寿命造成急剧损耗, 增加了 PIES 的日常运行成本。从长远来看, 这种模式不利于 PIES 的低碳效益及经济发展。从碳排放角度可以看出, 该场景下 PIES 的每日碳排放总量相当庞大, 单纯依靠能源转换来降低成本的

策略, 导致 PIES 能源耦合设备的碳效极低, 且对于用户而言负荷碳势也维持在很高的水平。虽然 PIES 自身运行成本较低, 但是其将给区域环境带来严重影响。

(2) 在云平台服务模式, 配置阶梯式碳排放模块用于低碳优化的 PIES 经济优化结果。

在云平台内配置阶梯式碳交易模块, 以实现抑制碳总排放量为主要目标的低碳优化。由表 1 可知, 在考虑低碳优化时, 云平台对下层 PIES 进行用能监管, 并以低碳环保为出发点对 PIES 提出用能建议。PIES 也积极响应云平台的调控指令, 用能结构发生较大变化。从碳排放可以看出, 该场景下的 PIES 每日碳排放总量明显下降。

(3) 在云平台服务模式, 配置碳流优化模块用于低碳优化的 PIES 经济优化结果。

在云平台内配置文中提出的碳流优化模块, 以实现抑制碳总排放量为主要目标的低碳优化。在该场景下云平台根据自身碳流优化模块对下层 PIES 进行用能监管并提出建议, 而 PIES 也能积极响应云平台下发的指令, 调整用能结构。同时, 云平台通过纳什议价模型协调下层各主体进行能源交互, 进一步节约成本提高能效, 并通过将剩余新能源电力出售促进消纳。从碳排放可以看出, 该场景下的 PIES 每日碳排放总量明显下降, 且用户层面用能终端的负荷碳势也有所降低, 实现了碳流层面的优化效果。

4.3 算例结果对比分析

对 3 种场景下优化策略的多方面效果进行对比分析。

4.3.1 用能成本及碳排情况分析

图 4 为 3 种场景下 PIES 的用能结构, 即不同方案的用能类型占比。

通过对比不同运行方案的最终用能占比可以发现, 碳流优化的效果与传统阶梯式碳交易机制的能耗结构优化结果类似。鉴于碳交易机制已被证明是低碳经济优化的有效方式, 这一发现从用能构成角度也证明碳流优化的有效性。值得指出的是, 碳交易机制的模型配置需要根据各主体规模及目标设定多个参数, 通常而言, 每个新增用能主体参与优化都将给整个区域带来 5~20 个新参数(如区间范围、步长、权重、阶段碳价等)及相关新变量, 这将给上层云平台的求解造成较大计算负担。而碳流优化方法不仅减排效果与碳交易模型优化十分接近, 更重要的是其通过计算主体的特定碳流指标来衡量碳势, 适用于不同类型和规模的优化主

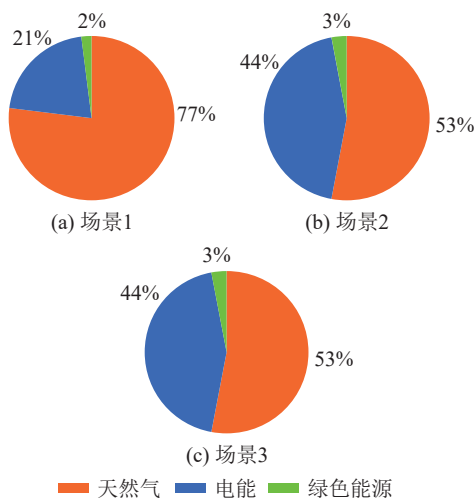


图4 PIES 能源输入占比对比

Fig.4 Comparison of PIES energy input proportion

体,减少了整个区域内需要处理的数据量,为云平台减轻了计算负担,提升了优化效率,具有很强的可扩展性。

调动 PIES 参与优化积极性的重点在于提升优化策略带来的经济效益。图 5 为实施碳流优化前后 PIES 每日运行成本对比。

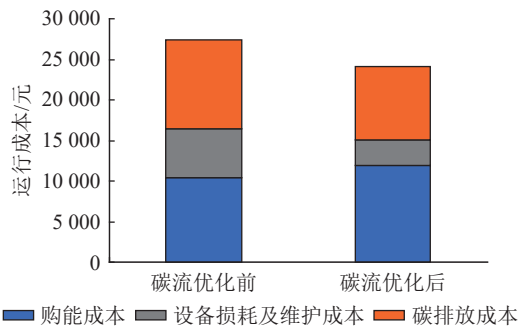


图5 PIES 每日运行成本对比

Fig.5 Comparison of daily operating costs of PIES

从经济效益角度分析,虽然购能成本高于优化前,但是生产用能结构的平衡带来了更大的综合效益。碳排放总量急剧减少降低了园区承担的环境惩罚成本,同时合理高效的 PIES 能源耦合方式也提升了系统内各耦合设备的工作效率,既延长了设备寿命,又降低了损耗和维护成本。总体来看,该策略为园区创造了可观的经济效益,也提升了 PIES 参与低碳优化的积极性。

PIES 优化前后每日碳排放量对比情况如图 6 所示。由对比可知,PIES 进行低碳优化后,每日碳排放量有了明显的降低。虽然在上午和傍晚的生产制造密集时段形成了碳排放高峰期,但从总体来看,基于碳流优化的运行模式有效减少了生产和能源耦合过程中碳排放总量,且在保障 PIES 的正常

生产和经济收益的同时,有力地推进了园区低碳化进程。

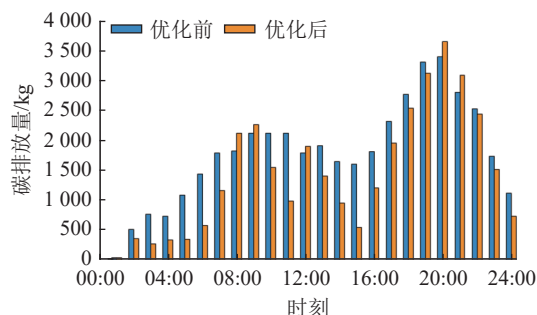


图6 PIES 每日碳排放量对比

Fig.6 Comparison of daily carbon emissions of PIES

4.3.2 PIES 运行过程中能流-碳流分析

图 7、图 8 展示了在 10:00 和 17:00 两个典型时刻的 PIES 接受碳流优化前后的能流和碳流情况,其中能流单位为 kW,碳流单位为 kgCO_2/h 。

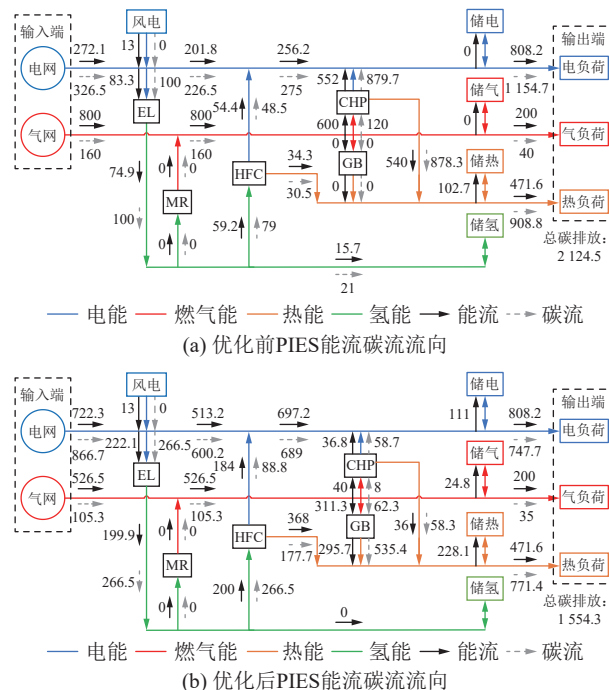


图7 碳流优化前后 PIES 10:00 能流碳流对比

Fig.7 Comparison of operating energy-carbon flow at 10:00 of PIES before and after carbon flow optimization

通过对比可以得到结论:

(1) 在负荷种类与负荷量不变的前提下,优化前的用能主体基于经济运行考量,主要依赖购入价格较低的天然气作为一次能源,这将导致区域用能结构失衡,进而需要大量提升 CHP 为主的能源耦合设备的出力以满足不同类型的负荷需求。而 CHP 属于高碳排设备,其大功率运行不仅导致碳效低下,还产生大量间接碳排放。在图 7(a)中体现为经过耦合节点后支路碳流量极高。经过文中所

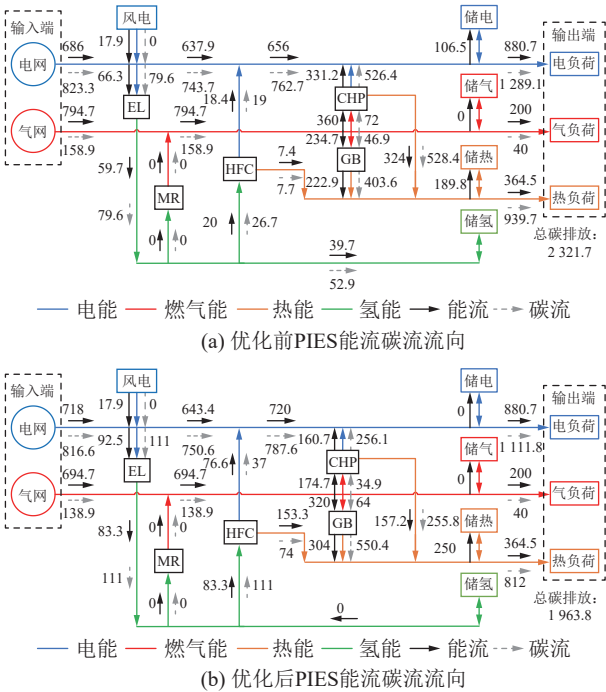


图 8 碳流优化前后 PIES 17:00 能流碳流对比
Fig.8 Comparison of operating energy-carbon flow at 17:00 of PIES before and after carbon flow optimization

设计的碳流优化后, PIES 用能占比得到了平衡, 如图 7(b)所示, CHP 及 GB 的能效与碳效得到了显著的

提升。
(2) 作为零碳排的绿色能源, 氢能的高效利用充分体现碳流优化的价值。图 7、图 8 对比案例中, 碳流优化前 PIES 严重忽视了以 HFC 为主的氢能耦合系统, 造成氢能的绿色优势难以发挥和设备资源的闲置。经过优化后, 氢能在能源耦合中的占比显著提高, 有效促进了电能和热能的碳效提升。

(3) 从碳流层面分析, PIES 的碳排放流向也得到了良好的优化效果。图 7、图 8 表明, PIES 在各类负荷量不变的前提下, 通过碳流优化不仅碳排放总量得到了显著的减少, 用能结构平衡也使天然气能源耦合产生的间接碳排放有效降低。通过碳流方向及碳排放责任分摊机制, 将碳排放总量归算到负荷侧后, 也能明显地看出负荷所承担的碳排放责任均显著下降。该结果不仅体现出碳流优化策略给 PIES 带来了碳排放总量的有效削减, 更能体现出系统内碳效的显著提升, 达到了碳流优化的主要目的。

通过对比 PIES 在不同策略优化前后的每日负荷碳势具体数值, 能够更加直观地体现出文中所提策略对于碳排放水平的改善效果。从表 2 可以看出, 实施碳流优化后, PIES 负荷碳势有了显著的下降。图 9 进一步对比了碳流优化效果与阶梯式碳

交易优化效果, 结果表明, 虽然两种策略较优化前均能降低碳势, 但是碳流优化后的负荷碳势在当日 80% 的时间段都低于碳交易后的结果, 总体效果更加优于阶梯式碳交易策略。通过比较可以证明文中提出的优化策略在碳流层面的有效性和技术优势。

表 2 PIES 碳流优化前后负荷碳势
Table 2 Load carbon potential of PIES before and after carbon flow optimization 单位: $\text{tCO}_2/(\text{MW}\cdot\text{h})$

时段	优化前 负荷碳势	优化后 负荷碳势	时段	优化前 负荷碳势	优化后 负荷碳势
00:00—01:00	0.70	0.50	12:00—13:00	1.13	0.68
01:00—02:00	1.09	0.38	13:00—14:00	1.29	0.45
02:00—03:00	0.99	0.45	14:00—15:00	1.40	0.93
03:00—04:00	1.41	0.44	15:00—16:00	1.50	1.26
04:00—05:00	1.40	0.55	16:00—17:00	1.18	1.08
05:00—06:00	1.12	0.72	17:00—18:00	1.12	1.06
06:00—07:00	0.89	1.04	18:00—19:00	1.11	1.30
07:00—08:00	0.99	1.20	19:00—20:00	1.92	1.16
08:00—09:00	1.33	0.98	20:00—21:00	1.08	1.04
09:00—10:00	1.35	0.64	21:00—22:00	1.07	0.93
10:00—11:00	0.93	1.01	22:00—23:00	1.28	0.81
11:00—12:00	1.07	0.81	23:00—00:00	0.95	0.70

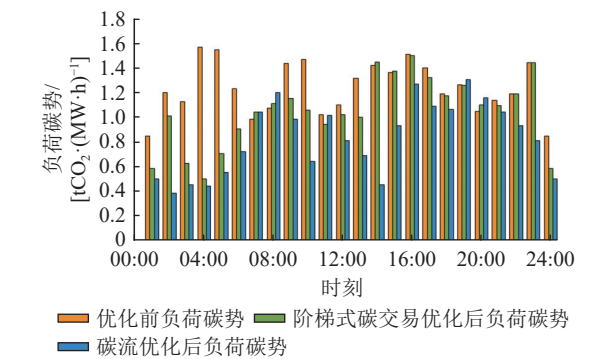


图 9 PIES 不同策略下负荷碳势对比
Fig.9 Comparison of load carbon potential under different strategies of PIES

4.3.3 考虑碳效的多主体交易结果分析
在算例中, 为模拟能源交易场景, 除了 PIES 作为高能耗的主体 1, 还设置了具有高新能源出力的主体 2, 共同作为双层架构中的下层参与博弈。通过云平台内置的纳什议价模块撮合主体间的交易行为, 提升能源交易效率。图 10 展示了主体 2 每日新能源出力及出售电量的数据。可以看出, 当新能源出力大于负荷需求时, 主体 2 会将多余的电力交易出售以提升自身的经济收益, 证明云平台内的纳什议价模块能够有效推动下层主体间的交易行为。

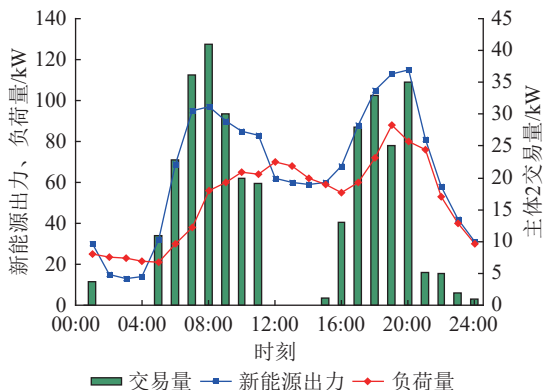


图 10 主体 2 每日能源出力及交易情况

Fig.10 Daily energy output and trading situation of subject 2

图 11 中展示了通过纳什议价进行交易前后主体 1 和主体 2 的经济成本对比。由于通过云平台从主体 2 购入价格低于上级电网电价的能源,从而缩减了主体 1 购能成本。而主体 2 则通过出售原本可能被弃用的新能源多余出力,获得了可观的经济效益,甚至在某些时段实现了正收益。主体 1 在交易前的每日总成本为 12 166 元,通过向主体 2 购入低成本的新能源后,每日总成本降至 10 537 元,降低了 13.4%。而主体 2 由于出售多余新能源,每日从原本 32.29 元的成本变为 49.14 元的正收入。由此可见,云平台通过纳什议价模块推动了下层平台的能源交易,在提升了交易效率的同时也提升了新能源的消纳率。

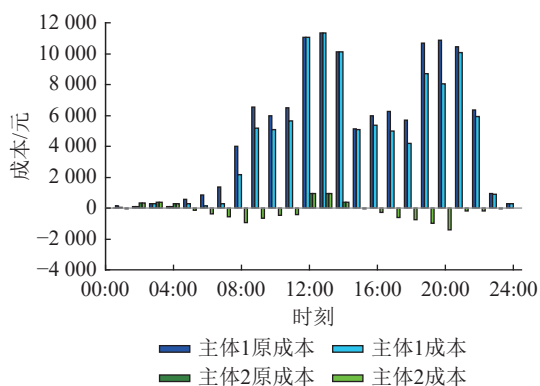


图 11 各主体能源交易前后经济成本对比

Fig.11 Comparison of economic costs before and after energy trading among various subjects

需要补充说明的是,云平台能够将超出负荷的新能源出力进行市场化交易获取收益,但交易时需要满足相应的电力等级要求和技术标准,确保出售的电能质量符合上级电网的接入要求,同时还需要了解电力市场的供需情况。具体交易方式以及注意事项文中不进行详细讨论。

值得强调的是,文中所设计的纳什议价模块能

够根据参与博弈的园区主体自身的碳排放水平设定交易权重,即通过云平台的交易辅助功能,使碳势更低的主体获得更高的经济效益。设计该特性的理由是进一步提升减碳提效的经济激励,将低碳优化成果转化为碳收益,鼓励园区更加积极地进行低碳经济优化。图 12 展示了不同碳势指标下的交易成本变化曲线,可以看出,文中设计的纳什议价模块可以增加园区碳收益,进一步加强低碳经济优化效果。

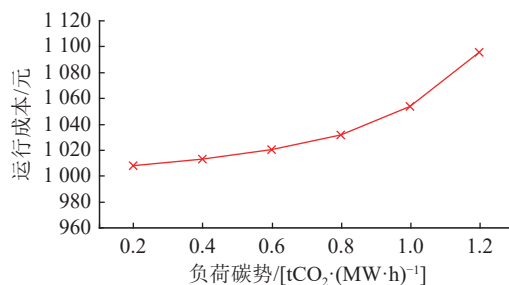


图 12 纳什议价后 PIES 运行成本与负荷碳势关系

Fig.12 The relationship between the operating cost and load carbon potential of PIES after Nash bargaining

总体而言,园区在应用了文中提出的云平台碳流优化策略后,园区能源系统改善显著。首先,能源结构得到优化,经济成本包括购能成本、PIES 碳排放经济惩罚成本、PIES 各设备维护及寿命折损成本,下降了 12.3%,如图 5 所示,提升了各主体参与优化的积极性;其次,碳排放总量明显降低,优化后降低了 19.7%,如图 6 所示,大力推动了 PIES 的低碳制造体系建设;最重要的是得益于云平台的碳流优化绿色服务,系统日均负荷碳势得到了显著的抑制,负荷碳势较优化前降低了 29.6%,如图 9 所示,碳效与能效得到了极大的提升;最后,文中设计的考虑碳流指标的纳什议价模型也能够扩大主体碳收益,促进减碳提效。

5 结论

为降低 PIES 碳排放量并提升碳效,文中构建了 PIES 双层优化模型,并在上层云平台设计了碳流优化模块引导下层 PIES 进行分布式低碳经济优化。通过算例仿真对比,得出以下结论:

(1) 文中构建的双层优化模型可以有效优化碳排放水平。上层云平台能够在下层 PIES 经济优化运行的同时减少碳排提升碳效。模型层间通过 ATC 进行信息交互,保证了用户隐私安全。双层模型支持 PIES 随时接入云平台享受服务,具有灵活性和可拓展性。

(2) 基于电力系统碳流理论,设计负荷碳势指

标。与阶梯式碳交易市场机制相比,碳流优化模型条件参数更少。通过碳势计算能够将碳排放责任进行分摊,从而促进 PIES 用能行为优化。优化后,PIES 碳排总量下降 19.7%,负荷碳势降低 29.6%,运行成本下降 12.3%。

(3) 所设计的考虑碳流指标的纳什议价模型能够扩大交易参与方碳收益。通过纳什议价模型撮合交易行为后,碳效越高的主体所获得的经济收益越高,进一步提升了各主体减排提效的积极性。

后续研究可以考虑进一步深化能流-碳流耦合建模,分析碳流优化对于设备特性及系统运行的影响因素,在完善碳流优化模型的基础上继续拓宽应用场景。

致 谢

本文得到江苏省高等学校基础科学(自然科学)研究项目(24K1B470018)资助,谨此致谢!

参考文献:

- [1] 陈吕军. “双碳”目标指引中国工业园区绿色发展[J]. *中国环境管理*, 2021, 13(6): 5-6.
CHEN Lujun. The goal of 'double carbon' guides the green development of China industrial park[J]. *Chinese Journal of Environmental Management*, 2021, 13(6): 5-6.
- [2] 冀肖彤, 杨东俊, 方仍存, 等. “双碳”目标下未来配电网构建思考与展望[J]. *电力建设*, 2024, 45(2): 37-48.
JI Xiaotong, YANG Dongjun, FANG Rengcun, et al. Research and prospect of future distribution network construction under dual carbon target[J]. *Electric Power Construction*, 2024, 45(2): 37-48.
- [3] 张沈习, 王丹阳, 程浩忠, 等. 双碳目标下低碳综合能源系统规划关键技术及挑战[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(8): 189-207.
ZHANG Shenxi, WANG Danyang, CHENG Haozhong, et al. Key technologies and challenges of low-carbon integrated energy system planning for carbon emission peak and carbon neutrality[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(8): 189-207.
- [4] 赵振宇, 任旭. 考虑动态能价及碳证交易的综合能源系统零碳优化[J]. *电力建设*, 2024, 45(8): 36-50.
ZHAO Zhenyu, REN Xu. Zero-carbon optimization of integrated energy system considering dynamic energy prices and carbon certificate trading[J]. *Electric Power Construction*, 2024, 45(8): 36-50.
- [5] 王思奇, 梁智娴, 王致杰, 等. 基于潮流和复杂网络理论的综合能源系统关键环节识别[J]. *电力科学与技术学报*, 2024, 39(3): 242-252.
WANG Siqi, LIANG Zhixian, WANG Zhijie, et al. Identification of key links in integrated energy system based on power flow and complex network theory[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2024, 39(3): 242-252.
- [6] 郭杰, 吴杰康, 洪明志, 等. 综合能源系统碳交易优化调度模型[J]. *供用电*, 2023, 40(11): 94-104.
GUO Jie, WU Jiekang, HONG Mingzhi, et al. Optimal scheduling model of carbon trading in integrated energy system[J]. *Distribution & Utilization*, 2023, 40(11): 94-104.
- [7] 袁晓冬, 曾飞, 缪惠宇, 等. 电热氢综合能源系统建模及容量规划研究[J]. *高压电器*, 2024, 60(7): 34-47.
YUAN Xiaodong, ZENG Fei, MIAO Huiyu, et al. Study on modelling and capacity planning of electric-thermal-hydrogen integrated energy systems[J]. *High Voltage Apparatus*, 2024, 60(7): 34-47.
- [8] 朱浩昊, 朱继忠, 李盛林, 等. 电-热综合能源系统优化调度综述[J]. *全球能源互联网*, 2022, 5(4): 383-397.
ZHU Haohao, ZHU Jizhong, LI Shenglin, et al. Review of optimal scheduling of integrated electricity and heat systems[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2022, 5(4): 383-397.
- [9] 耿光飞, 党宣, 张启春. 基于统一功率流的综合能源系统碳流计算方法[J]. *电力建设*, 2024, 45(12): 140-148.
GENG Guangfei, DANG Xuan, ZHANG Qichun. Carbon flow calculation method of integrated energy system based on unified power flow[J]. *Electric Power Construction*, 2024, 45(12): 140-148.
- [10] 赵北涛, 刘光宇, 韩东升. 考虑氢能耦合及阶梯碳交易的综合能源系统多时间尺度低碳优化调度[J]. *电力科学与技术学报*, 2023, 38(3): 35-46.
ZHAO Beitao, LIU Guangyu, HAN Dongsheng. Multi-time-scale low-carbon optimal scheduling of integrated energy systems considering hydrogen energy coupling and ladder carbon trading[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2023, 38(3): 35-46.
- [11] 王海洋, 李珂, 张承慧, 等. 基于主从博弈的社区综合能源系统分布式协同优化运行策略[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(17): 5435-5445.
WANG Haiyang, LI Ke, ZHANG Chenghui, et al. Distributed coordinative optimal operation of community integrated energy system based on Stackelberg game[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(17): 5435-5445.
- [12] 王琦, 李宁, 顾欣, 等. 考虑碳减排的综合能源服务商合作运行优化策略[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(7): 131-140.
WANG Qi, LI Ning, GU Xin, et al. Optimization strategy for cooperative operation of integrated energy service providers considering carbon emission reduction[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(7): 131-140.
- [13] 陈胜, 卫志农, 顾伟, 等. 碳中和目标下的能源系统转型与变革: 多能流协同技术[J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(9): 3-12.
CHEN Sheng, WEI Zhinong, GU Wei, et al. Carbon neutral oriented transition and revolution of energy systems: multi-energy flow coordination technology[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(9): 3-12.
- [14] 田丰, 贾燕冰, 任海泉, 等. 考虑碳捕集系统的综合能源系统

- “源-荷”低碳经济调度[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3346-3355.
- TIAN Feng, JIA Yanbing, REN Haiquan, et al. 'Source-load' low-carbon economic dispatch of integrated energy system considering carbon capture system[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3346-3355.
- [15] 陈锦鹏, 胡志坚, 陈颖光, 等. 考虑阶梯式碳交易机制与电制氢的综合能源系统热电优化[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 48-55.
- CHEN Jinpeng, HU Zhijian, CHEN Yingguang, et al. Thermo-electric optimization of integrated energy system considering ladder-type carbon trading mechanism and electric hydrogen production[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 48-55.
- [16] 王磊, 姜涛, 宋丹, 等. 基于灵活热电比的区域综合能源系统多目标优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(8): 151-159.
- WANG Lei, JIANG Tao, SONG Dan, et al. Multi-objective optimal dispatch of a regional integrated energy system based on a flexible heat-to-electric ratio[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(8): 151-159.
- [17] CHENG Y H, ZHANG N, WANG Y, et al. Modeling carbon emission flow in multiple energy systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 3562-3574.
- [18] 边晓燕, 吴珊, 赵健, 等. 考虑源荷碳责任分摊的新型电力系统多级灵活性资源规划[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(2): 155-164.
- BIAN Xiaoyan, WU Shan, ZHAO Jian, et al. Multi-level flexible resource planning of new power system considering source-load carbon responsibility allocation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(2): 155-164.
- [19] 王常乐, 刘海涛, 窦真兰, 等. 基于园区 IES 购电方案优化的低碳运行模型[J]. 高电压技术, 2023, 49(4): 1441-1454.
- WANG Changle, LIU Haitao, DOU Zhenlan, et al. Low carbon operation model based on the optimization of power purchase in park IES[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(4): 1441-1454.
- [20] 严中华, 王建功, 朱英刚, 等. 考虑碳排放流理论的风-碳捕集-电转气联合新型中长期调度方式[J]. 智慧电力, 2022, 50(6): 14-21.
- YAN Zhonghua, WANG Jiangong, ZHU Yinggang, et al. New medium-long term dispatching mode of wind-carbon capture-P2G combined system considering carbon emission flow theory[J]. Smart Power, 2022, 50(6): 14-21.
- [21] 邱彬, 宋绍鑫, 王凯, 等. 计及需求响应和阶梯型碳交易机制的区域综合能源系统优化运行[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(5): 87-95, 101.
- QIU Bin, SONG Shaoxin, WANG Kai, et al. Optimal operation of regional integrated energy system considering demand response and ladder-type carbon trading mechanism[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2022, 34(5): 87-95, 101.
- [22] 彭春华, 张海洋, 孙惠娟, 等. 碳交易机制下综合能源市场多供能主体均衡竞价策略[J]. 电网技术, 2022, 46(2): 463-471.
- PENG Chunhua, ZHANG Haiyang, SUN Huijuan, et al. Balanced bidding strategy for multiple energy suppliers in the integrated energy market under carbon trading mechanism[J]. Power System Technology, 2022, 46(2): 463-471.
- [23] 刘月. 数字平台能力、价值共创与平台企业竞争优势关系研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- LIU Yue. Research on the effect of digital platform capability and value co-creation on competitive advantage in platform firm[D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [24] 王汝英, 陈文康, 闫松, 等. 综合能源互联网云平台的应用[J]. 供用电, 2019, 36(3): 2-7, 26.
- WANG Ruying, CHEN Wenkang, YAN Song, et al. Development and application of integrated energy Internet platform[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(3): 2-7, 26.
- [25] 张昱, 何春林. 智能配电网技术在配电网运行中的应用与研究[J]. 电工技术, 2023(S1): 143-145.
- ZHANG Yu, HE Chunlin. Application and research of intelligent distribution network technology in distribution network operation[J]. Electric Engineering, 2023(S1): 143-145.
- [26] 张康宏, 艾林, 张芳涛, 等. 云服务平台的运维服务模式构建[J]. 数字通信世界, 2022(9): 38-40.
- ZHANG Kanghong, AI Lin, ZHANG Fangtao, et al. Construction of operation and maintenance service mode of cloud service platform[J]. Digital Communication World, 2022(9): 38-40.
- [27] YANG C, LIU J J, LIAO H X, et al. An improved carbon emission flow method for the power grid with prosumers[J]. Energy Reports, 2023, 9: 114-121.
- [28] YU H B, SUN W Y, ZHAO Y, et al. Carbon emission area division of power system considering carbon[J]. Energy Reports, 2023, 9: 618-627.
- [29] LIU Z Y, XING H J, LUO Y F, 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.
- [30] 张笑演, 王檐裕, 黄蕾, 等. 考虑扩展碳排放流和碳交易议价模型的园区综合能源优化调度[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(9): 34-46.
- ZHANG Xiaoyan, WANG Luyu, HUANG Lei, et al. Optimal dispatching of park-level integrated energy system considering augmented carbon emission flow and carbon trading bargain model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(9): 34-46.
- [31] HUANG J H, DUAN W Y, ZHOU Q, et al. Methodology for carbon emission flow calculation of integrated energy systems[J]. Energy Reports, 2022, 8: 1090-1097.
- [32] GAO J W, MENG Q C, LIU J T, et al. Thermoelectric optimization of integrated energy system considering wind-photo-voltaic uncertainty, two-stage power-to-gas and ladder-type

- carbon trading[J]. *Renewable Energy*, 2024, 221: 119806.
- [33] 芮涛, 李国丽, 王群京, 等. 配电侧多微电网日前电能交易纳什议价方法[J]. *电网技术*, 2019, 43(7): 2576-2585.
- RUI Tao, LI Guoli, WANG Qunjing, et al. Nash bargaining method for multi-microgrid energy trading in distribution network[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(7): 2576-2585.
- [34] 周鹏, 朱晓彤, 吴俊, 等. 考虑参与碳交易市场的大规模屋顶光伏经济性分析[J]. *电力工程技术*, 2023, 42(6): 83-90.
- ZHOU Peng, ZHU Xiaotong, WU Jun, et al. Economic analysis of large-scale rooftop photovoltaics considering carbon trading market[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2023, 42(6): 83-90.
- [35] XIONG Z, LUO S H, WANG L L, et al. Bi-level optimal low-carbon economic operation of regional integrated energy system in electricity and natural gas markets[J]. *Frontiers in Energy Research*, 2022, 10: 959201.
- [36] 顾欣, 王琦, 胡云龙, 等. 基于纳什议价的多微网综合能源系统分布式低碳优化运行策略[J]. *电网技术*, 2022, 46(4): 1464-1482.
- GU Xin, WANG Qi, HU Yunlong, et al. Distributed low-carbon optimal operation strategy of multi-microgrids integrated energy system based on Nash bargaining[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(4): 1464-1482.
- [37] WU J Z, ZHENG J Y, MEI F, et al. Reliability evaluation method of distribution network considering the integration impact of distributed integrated energy system[J]. *Energy Reports*, 2022, 8: 422-432.

作者简介:



郭禹辰

郭禹辰(1998), 男, 硕士, 研究方向为综合能源系统、低碳经济优化(E-mail: 986279738@qq.com);

王琦(1975), 女, 博士, 教授, 通信作者, 研究方向为新能源并网运行控制、综合能源优化运行、新型储能与电网互动技术;

王猛(1998), 男, 硕士, 研究方向为综合能源系统储能电池的均衡管理与优化调度。

Low carbon economic operation strategy of park integrated energy system considering carbon flow optimization

GUO Yuchen^{1,2}, WANG Qi^{1,2}, WANG Meng^{1,2}, WANG Zhiyuan^{1,2}, LIU Yuchi^{1,2}, CHEN Yan³

(1. School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China;

2. Jiangsu Province Integrated Energy Equipment and Integration International Joint Laboratory, Nanjing 210046, China;

3. Nantong Tongzhou District Power Supply Branch of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nantong 226300, China)

Abstract: Although numerous studies have investigated low carbon optimization for park integrated energy system (PIES) under dual-carbon goals, few have proposed strategies to enhance carbon efficiency from carbon flow analysis. Therefore, a cloud platform-based low carbon economic operation strategy for PIES is proposed, considering carbon flow optimization. Firstly, a two-layer collaborative optimization architecture is constructed, where the upper-layer cloud platform designs a carbon flow optimization module to provide suggestions to the lower-layer PIES, then the lower-layer cloud platform adjust their energy consumption plans for collaborative optimization. Secondly, the load carbon potential indicator is developed to measure the carbon flow of PIES, guiding them through the cloud platform to reduce load carbon potential and improve system carbon emission efficiency. Additionally, a Nash bargaining module incorporating carbon efficiency is designed to maximize participants' benefits of multi-subject transactions. Then the target cascade analysis method is applied to solve the two-layer model. Finally, simulation results verify that the PIES operation strategy considering carbon flow optimization can reduce carbon emissions, improve carbon efficiency, and enhance economic benefits while promoting energy trading between PIES and increasing carbon profits.

Keywords: park integrated energy system (PIES); carbon flow optimization; carbon flow theory; analytical target cascading; carbon emission efficiency; low carbon economy optimization

(编辑 吴昊)