

张良华,张长浩,朱晔,等.基于零碳路径约束的源网荷储系统低碳优化调度研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(5):597-605.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20250156

ZHANG Lianghua, ZHANG Changhao, ZHU Ye, et al. Research on optimization strategy of source-grid-load-storage system for carbon reduction based on zero-carbon path constraints[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2025, 44(5): 597-605. DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20250156

基于零碳路径约束的源网荷储系统低碳优化调度研究

张良华¹, 张长浩², 朱晔¹, 王迎春^{3*}

(1. 国网电力科学研究院 武汉能效测评有限公司, 湖北 武汉 430000;

2. 国网数字科技控股有限公司, 河北 雄安, 070001; 3. 东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 为应对多能耦合系统的调度挑战并实现低碳目标, 提出一种基于零碳路径约束的源网荷储系统低碳优化调度方法。引入零碳路径约束与绿电指数, 通过动态调控碳排放上限和绿色电力比例, 引导系统向零碳目标演进。构建兼顾经济性与绿色电力占比的调度优化模型, 提升系统运行的低碳性与协调性。设计改进的鲸鱼优化算法, 采用加权最优个体选择策略与非线性收敛因子, 增强算法的全局搜索与局部优化能力。仿真结果表明, 所提方法在提升调度效能、降低波动性以及实现低碳与经济目标方面效果显著。研究结论可为类似场景下的多能耦合系统优化调度提供参考。

关键词: 源网荷储; 零碳路径; 绿电指数; 鲸鱼算法; 优化调度; 多能互补

中图分类号: TM73

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2025)05-0597-09

Research on optimization strategy of source-grid-load-storage system for carbon reduction based on zero-carbon path constraints

ZHANG Lianghua¹, ZHANG Changhao², ZHU Ye¹, WANG Yingchun^{3*}

(1. Wuhan Efficiency Evaluation Company Limited, State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430000, China; 2. State Grid Digital Technology Holding Company Limited, Xiong'an 070001, China; 3. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: This paper proposes a low-carbon optimal dispatch method for source-grid-load-storage systems based on zero-carbon path constraints to address the scheduling challenges arising from multi-energy coupling and achieve low-carbon objectives. First, zero-carbon path constraints and a green electricity index are introduced to guide the system toward carbon neutrality by flexibly adjusting the carbon emission cap and the proportion of green electricity. Then, an optimization model is constructed that balances economic performance and green electricity penetration to enhance the system's low-carbon and coordinated operation. An improved whale optimization algorithm is developed to improve solving efficiency, incorporating a weighted elite selection strategy and a nonlinear convergence factor to enhance global exploration and local exploitation capabilities. Simulation results demonstrate that the proposed model and algorithm effectively improve dispatch performance, reduce system fluctuations, and achieve both low-carbon and economic goals. The research results can provide a reference for the optimization scheduling of multi-energy coupling systems in similar scenarios.

Keywords: source-grid-load-storage; zero-carbon pathway; green power index; whale optimization algorithm; optimal scheduling; multi-energy complementarity

收稿日期: 2025-04-12 修回日期: 2025-05-22 接受日期: 2025-06-12 责任编辑: 朱含露

基金项目: 国家电网公司总部科技项目 (5400-202372573A-3-2-ZN)

作者简介: 张良华 (1980-), 男, 湖北 荆州人, 博士, 高级工程师, 主要从事电力电子系统方面的研究。E-mail: 1202658@qq.com

通信作者: 王迎春 (1974-), 男, 辽宁 辽阳人, 博士, 教授, 主要从事综合能源系统优化方面的研究。E-mail: wangyingchun@ise.neu.edu.cn

0 引言

当前气候变化日益严重,电力系统已成为主要碳排放源,其低碳转型势在必行^[1]。为实现全球气候目标,构建零碳能源系统已成为各国核心任务之一^[2]。在此背景下,研究源网荷储系统的智能低碳优化调度,特别是考虑零碳路径约束的优化方法,对实现低碳可持续发展具有重要意义。

近年来,零碳路径约束在能源系统优化中受到广泛关注。文献[3]提出结合零碳路径的风光水协调调度模式,降低了电力系统碳排放。文献[4]在零碳路径约束下,提出风光储一体化电网的优化调度模型,利用可再生能源互补性与储能调节能力实现路径优化。文献[5]通过智能电网中的多负荷调度,提出动态负荷管理策略,但对多能源协调调度考虑不足。文献[6]提出多能源系统分布式优化方法,但该方法在面对大规模电网时存在较高的计算复杂度。文献[7]结合需求响应技术,提出一种零碳路径约束下的能源管理方法,但受到用户参与度的限制,其应用效果不佳。在零碳路径约束的研究中,文献[8]基于负荷预测与能源流模拟的优化框架,解决了可再生能源的波动性问题。文献[9]结合大数据实时监测技术提出优化策略,提高了预测精度和调度效率,但如何平衡负荷需求与多种能源之间的复杂约束,仍然是一个亟待解决的难题。在源网荷储系统优化调度过程中,文献[10]通过优化电化学储能系统的充放电过程,实现能源的高效利用。文献[11]提出利用电动汽车作为移动储能的充放电策略提高能源利用率,但由于电动汽车的不确定性,其协调调度仍然面临较大的挑战。文献[12]基于电池储能的优化方法缓解可再生能源波动,但其大规模电网适应性需提升。文献[13]通过智能控制技术联合优化储能与负荷,结合蚁群算法求解,提高了调度效率。然而,不同场景对算法性能的要求各异,优化算法选择至关重要。传统的优化算法,如遗传算法^[14]和粒子群算法^[15],普遍存在收敛速度慢、易陷入局部最优的问题。改进粒子群算法虽能处理储能约束与负荷调节,但在计算效率与全局搜索能力上仍有不足^[16]。鲸鱼优化算法(WOA)因其全局搜索能力强、收敛速度快而备受关注,并已应用于风光储系统优化,但在处理复杂多约束问题时存在局限性^[17]。后续研究通过引入自适应机制^[18]、局部搜索策略^[19]、结合差分算法^[20]、贝叶斯理论^[21]、粒子群优化^[22]、遗传算法^[23]、神经网络^[24]以及开发多目标版本^[25]等方式改进WOA,提升了搜索效率、

精度及多目标/动态调度中的表现,然而面对大规模问题时,仍存在效率下降或计算效率较低等挑战。

因此,本文提出一种融合零碳路径约束的源网荷储智能低碳优化调度方法。该方法通过构建绿电指数与约束机制,并结合改进鲸鱼优化算法,构建适用于复杂电网的智能调度模型。

1 绿电指数设计与零碳路径约束

1.1 零碳路径约束的定义与数学表达

零碳路径约束要求任意时刻 t ,碳排放量 C_t 不超过一个动态调整的碳排放上限,表示为

$$C_{\max,t}^* = C_0 \left(1 - \beta \frac{t}{T}\right), \quad (1)$$

式中: $C_{\max,t}^*$ 为时刻 t 的碳排放上限, tCO_2e ; C_0 为初始时刻 $t=0$ 的碳排放上限, tCO_2e ; β 为递减速率系数, $\beta \in (0,1)$; T 为调度周期的总时长, a ; t 为从调度周期起始时刻开始计算的时间, a 。

为应对实际负荷需求和可再生能源波动的影响,引入动态调整因子,调整后的碳排放上限为

$$C_{\max,t} = C_0 \left(1 - \beta \frac{t}{T}\right) \left(1 + \gamma \frac{L_t}{L_{\max}}\right), \quad (2)$$

式中: γ 为调整系数; L_t 和 $L_{\max}$ 分别为 t ($\forall t \leq T$)时刻和调度周期内的最大负荷需求。

零碳路径约束为

$$C_t \leq C_{\max,t} \quad (3)$$

该约束可确保各时刻碳排放不超出设定上限。同时,为控制整体排放水平,引入调度周期内的总碳排放约束

$$\sum_{t=1}^T C_t \leq C_{\max,\text{tot}}, \quad (4)$$

式中, $C_{\max,\text{tot}}$ 为调度周期内允许的最大累计碳排放量, tCO_2e 。

1.2 绿电指数的构建

绿电指数(green electricity index, GEI)用于衡量能源系统中绿色电力的利用程度及其碳减排贡献。该指数综合考虑可再生能源占比与碳排放控制效果,全面反映绿色电力的优先调度情况。其表达式为

$$\text{GEI} = w_1 \sum_{t=1}^T E_{\text{re},t} / E_{\text{tot},t} - w_2 \sum_{t=1}^T C_t / C_{\max,t}, \quad (5)$$

式中: w_1 , w_2 为可调的权重系数,控制可再生能源比例和碳排放控制对绿电指数的影响,且 $w_1 + w_2 = 1$; $E_{\text{re},t} / E_{\text{tot},t}$ 为 t 时刻的可再生能源发电量占总发电量的比例,反映系统绿色电力的使用程度;

$C_t/C_{\max,t}$ 为 t 时刻碳排放量占碳排放上限的比例,反映碳排放的控制效果。考虑碳排放的滞后性与波动性,可进一步将绿电指数细化为动态时变形式

$$GEI(t) = \sum_{t=1}^T \left[w_1(t) \frac{E_{re,t}}{E_{tot,t}} - w_2(t) \frac{C_t}{C_{\max,t}} \right], \quad (6)$$

式中,可调权重系数 $w_1(t)$ 、 $w_2(t)$ 可以根据 t 时刻的负荷波动、可再生能源发电水平以及碳排放的实时需求动态调整。

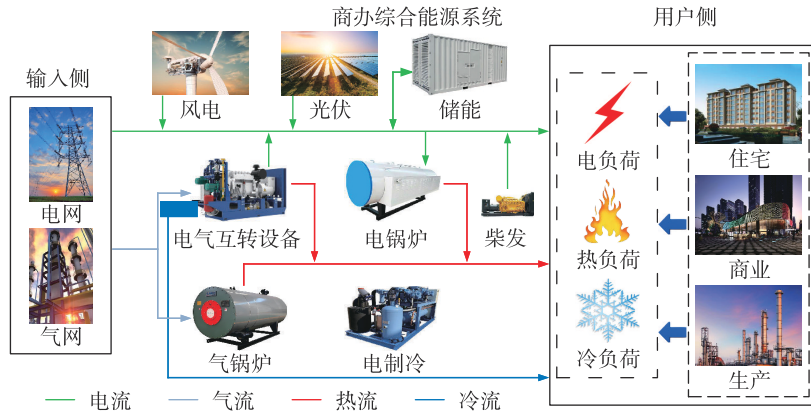


图1 系统结构

Fig.1 system architecture

2.2 源网荷储建模

为实现相关系统的优化调度和高效运行,需对能源系统中各关键子系统的能量流动与转换特性进行精确建模。本节详细构建源、网、荷、储各环节的数学模型,作为优化调度的基础。

(1) 可再生能源发电

对风力发电建模,风力发电功率 $P_{wt}(t)$ 与风速 $v(t)$ 的关系可采用威布尔分布来表示。设风速 $v(t)$ 服从威布尔分布,其概率密度函数为

$$f(v(t)) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{v(t)}{\lambda} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{v(t)}{\lambda} \right)^k \right], \quad (7)$$

式中: k 为形状参数; λ 为尺度参数。

风电功率 $P_{wt}(t)$ 可表示为

$$P_{wt}(t) = \begin{cases} 0 & v(t) < v_{cut-in} \\ P_{\max} \left(\frac{v(t) - v_{cut-in}}{v_{rated} - v_{cut-in}} \right)^3 & v_{cut-in} \leq v(t) \leq v_{rated} \\ P_{\max} & v_{rated} < v(t) \leq v_{cut-out} \\ P_{\max} & v(t) > v_{cut-out} \end{cases}, \quad (8)$$

式中: $P_{\max}$ 为最大可发电功率, kW; v_{cut-in} 、 $v_{cut-out}$ 和 v_{rated} 分别为切入、切出和额定风速, m/s。

对光伏系统进行建模,光伏功率 $P_{pv}(t)$ 与光照强度 $I(t)$ 的关系为

$$P_{pv}(t) = \eta_{pv} A_{pv} I(t), \quad (9)$$

2 系统建模和目标函数

2.1 源网荷储系统结构

源网荷储系统由风电、光伏、储能、柴油发电机、电转气、锅炉、电制冷等设备构成,涵盖电、热、冷及可控负荷,见图1。各设备通过能量流动与转换实现互联互通,优化园区能源调配。电能可储存、转化为气体或驱动热冷设备,热能和气体通过管网输送至负荷节点,实现高效利用。

式中: η_{pv} 为转化系数; A_{pv} 为光伏阵列的面积, m^2 。

(2) 传统发电

柴油发电机的输出功率 $P_{dg}(t)$ 与燃料相关,其数学模型为

$$P_{dg}(t) = \eta_{dg} F_{dg}(t), \quad (10)$$

式中: η_{dg} 为柴油发电机效率, kW·h/kg; $F_{dg}(t)$ 为燃料消耗速率, kg/h。

(3) 电网交互

当园区内综合能源系统无法满足园区用电时,需要向上级电网进行购电。设上级电网供电功率为 $P_g(t)$,电网购电成本为 $C_g(t)$,电网购电碳排放系数为 $E_g(t)$ 。

(4) 能源转换设备

电转气设备的输出功率 $P_{p2g}(t)$ 和转化效率 η_{p2g} 的数学关系为

$$P_{p2g}(t) = \eta_{p2g} P_{gas}(t), \quad (11)$$

式中, $P_{gas}(t)$ 为输入到电转气设备的天然气功率, kW。

电锅炉功率 $P_{cb}(t)$ 和效率 η_{cb} 的关系为

$$Q_{heat}(t) = \eta_{cb} P_{cb}(t), \quad (12)$$

式中, $Q_{heat}(t)$ 为电锅炉的热输出功率, kW。

电制冷设备功率 $P_{cc}(t)$ 和效率 η_{cc} 的关系为

$$P_{cc}(t) = \eta_{cc} P_c(t), \quad (13)$$

式中, $P_c(t)$ 为电制冷设备的输入功率, kW。

气转电设备功率 $P_{\text{cle}}(t)$ 和效率 η_{g2p} 的关系为

$$P_{\text{cle}}(t) = \eta_{\text{g2p}} P_{\text{g2p}}(t) \quad (14)$$

供热系统的功率 $P_{\text{hs}}(t)$ 和效率 η_{hs} 的关系为

$$Q_{\text{heat,hs}}(t) = \eta_{\text{hs}} P_{\text{hs}}(t), \quad (15)$$

式中, $Q_{\text{heat,hs}}(t)$ 为供热系统的热输出功率, kW。

(5) 储能系统

电池储能系统的状态方程为

$$E_b(t+1) = E_b(t) + \eta_{\text{ch}} P_{\text{ch}}(t) - \frac{P_{\text{dis}}(t)}{\eta_{\text{dis}}}, \quad (16)$$

式中: $E_b(t)$ 为 t 时刻的电池储能状态, kW; $P_{\text{ch}}(t)$ 和 $P_{\text{dis}}(t)$ 分别为 t 时刻的充电和放电功率, kW; η_{ch} 和 η_{dis} 为 t 时刻的充放电效率。

2.3 约束条件与目标函数

采用领域通用的系统约束条件, 在此基础上, 为协同优化系统运行的经济性与绿色低碳效益, 建立如下目标函数

$$\min J = \gamma_1 C_{\text{tot}}(t) + \gamma_2 \text{GEI}^{-1}(t), \quad (17)$$

$$\gamma_1 + \gamma_2 = 1, \quad (18)$$

式中: $\text{GEI}^{-1}(t)$ 为绿电指数的倒数; γ_1 和 γ_2 为根据专家经验确定的权重系数; $C_{\text{tot}}(t)$ 为经济目标函数, 反映系统运行的直接经济性, 可表示为

$$\begin{aligned} C_{\text{tot}}(t) = & C_g P_g(t) + C_{\text{wt}} P_{\text{wt}}(t) + C_{\text{pv}} P_{\text{pv}}(t) + \\ & C_{\text{ch}} P_{\text{ch}}(t) - R_{\text{dis}} P_{\text{dis}}(t) + C_{\text{dg}} P_{\text{dg}}(t) + \\ & C_{\text{p2g}} P_{\text{p2g}}(t) + C_{\text{cb}} P_{\text{cb}}(t) + C_{\text{ec}} P_{\text{ec}}(t) + \\ & C_{\text{g2p}} P_{\text{g2p}}(t) + C_{\text{hs}} P_{\text{hs}}(t), \end{aligned} \quad (19)$$

式中: C_g 为电网购电单位成本, 元/kW; C_{wt} 为风电单位发电成本, 元/kW; C_{pv} 为光伏单位发电成本, 元/kW; C_{ch} 为储能充电单位成本, 元/kW; R_{dis} 为储能放电单位收益, 元/kW; C_{dg} 为柴油发电机单位发电成本, 元/kW; C_{p2g} 为电转气设备单位转化成本, 元/kW; C_{cb} 为电锅炉单位运行成本, 元/kW; C_{ec} 为电制冷设备单位运行成本, 元/kW; C_{g2p} 为气转电设备单位转换成本, 元/kW; C_{hs} 为供热系统单位运行成本, 元/kW。

3 模型求解方法

3.1 原始鲸鱼算法

鲸鱼优化算法 (WOA) [18] 是一种模拟座头鲸螺旋围捕与随机搜索行为的自然启发式算法, 通过螺旋轨迹逼近猎物, 实现全局与局部搜索。其位置更新可表示为

$$X_{t+1} = X^* - AD, \quad (20)$$

式中: X_{t+1} 为下一代的位置; X^* 为当前最优解的位置; A 为控制跳跃步幅的系数; D 为当前位置与最

优解之间的差值。

除围捕运动, 鲸鱼还可以通过螺旋运动更新位置, 以增强搜索的多样性和精确度。螺旋运动的更新公式为

$$X_{t+1} = X^* - AD \cos(2\pi l), \quad (21)$$

式中, l 为随机生成的变量, 用于调整螺旋的形状, 增强局部搜索的效果。

当围捕行为未能奏效时, 鲸鱼会切换至随机搜索模式, 增强全局搜索能力, 更新公式为

$$X_{t+1} = X + r(X^* - X_t), \quad (22)$$

式中: r 为 $[0,1]$ 内的随机数, 用于调节步幅; X_t 为当前鲸鱼个体的位置。

鲸鱼优化算法通过模拟鲸鱼捕食的螺旋围捕和随机搜索, 平衡全局搜索与局部开发, 提升优化过程的精度和效率。

3.2 改进鲸鱼算法

鲸鱼优化算法存在易陷入局部最优、收敛速度慢的问题, 对此学者提出多种改进策略 [18-25]。但这些方法普遍存在结构复杂、参数调节困难、计算量大等问题, 难以兼顾优化性能与计算效率。基于此, 本文采用加权最优与柯西变异机制替代传统最优个体更新方式, 提升种群多样性和局部最优逃逸能力, 设计具有扰动调节功能的非线性收敛因子, 实现全局探索与局部开发的动态平衡, 提高算法稳定性与收敛效率。改进鲸鱼算法流程图 2。其中, P 为 0 到 1 间的随机数, 当 $P > 0.5$ 时, 进行螺旋更新。

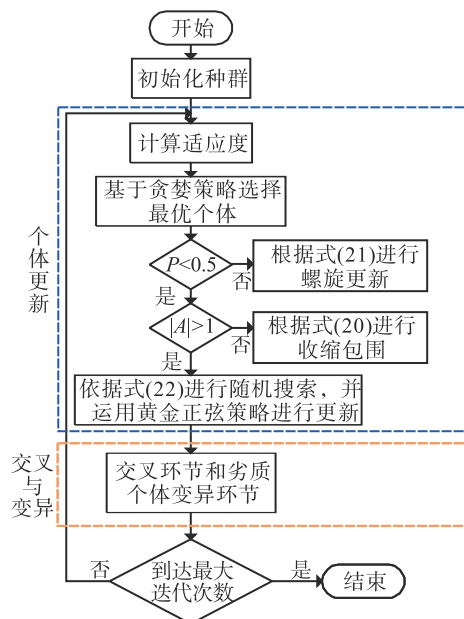


图2 改进鲸鱼算法流程

Fig.2 process of the improved whale optimization algorithm

(1) 最优个体选择策略

原始鲸鱼优化算法仅依赖当前适应度最优个体引导搜索,易导致种群多样性不足并陷入局部最优解。为提升全局搜索能力,引入加权最优个体、柯西变异个体与当前最优个体进行适应度对比,并从中筛选出适应度最优的个体作为新解,驱动种群更新。

加权最优个体通过融合最优个体、次优个体和较优个体的适应度权重来获得更新公式,权重更新式为

$$\mathbf{X}_w = \rho_1 \mathbf{X}_1 + \rho_2 \mathbf{X}_2 + \rho_3 \mathbf{X}_3, \quad (23)$$

式中: $\mathbf{X}_1$ 、 $\mathbf{X}_2$ 、 $\mathbf{X}_3$ 分别表示最优、次优和较优个体的位置; ρ_1 、 ρ_2 、 ρ_3 为它们对应的适应度权重。

$$\begin{cases} \rho_1 = \frac{f_1}{f_1 + f_2 + f_3} \\ \rho_2 = \frac{f_2}{f_1 + f_2 + f_3} \\ \rho_3 = \frac{f_3}{f_1 + f_2 + f_3} \end{cases}, \quad (24)$$

式中, f_1 、 f_2 、 f_3 分别为最优、次优和较优个体的适应度值。

柯西变异最优个体通过引入柯西分布扰动,增强局部最优解的跳出能力,避免算法陷入局部最优。柯西变异的更新公式为

$$\mathbf{X}_c = \mathbf{X} + \text{Cauchy}(0, 1), \quad (25)$$

式中, $\mathbf{X}_c$ 为变异后的个体位置; $\mathbf{X}$ 为变异前的个体位置; $\text{Cauchy}(0, 1)$ 表示从标准柯西分布中生成的扰动项,能够有效增加搜索空间的探索范围。

每次迭代时,算法会从当前最优个体、加权最优个体和柯西变异最优个体中选择适应度值最高的个体作为新的最优解。假设当前最优个体为 $\mathbf{X}_b$, 加权最优个体为 $\mathbf{X}_w$, 柯西变异最优个体为 $\mathbf{X}_c$, 则新的最优个体 $\mathbf{X}_n$ 的选择公式为

$$\mathbf{X}_n = \arg \max (f(\mathbf{X}_b), f(\mathbf{X}_w), f(\mathbf{X}_c)), \quad (26)$$

式中: $f(\mathbf{X})$ 表示个体 $\mathbf{X}$ 的适应度值; $\arg \max(\cdot)$ 表示选择适应度值最大的个体。

这一改进增强了种群的多样性,避免过早收敛,可有效提高算法的全局搜索能力,避免局部最优的困境。

(2) 非线性收敛因子

原始鲸鱼算法中的收敛因子 A 通常以线性方式递减,这会在早期阶段限制全局探索能力,在后期则可能导致局部搜索不足。为此,提出一种非线性收敛因子的改进方案。改进后的收敛因子 $a(t)$ 为

$$a(t) = a_0 \left[1 - \left(t/T \right)^m \right] + \delta \sin(2\pi t/T), \quad (27)$$

式中: a_0 为初始收敛因子; m 控制收敛因子的衰减速度; δ 为扰动幅度,控制突变的幅度; t 为当前迭代次数; T 为最大迭代次数; $\sin(2\pi t/T)$ 为扰动变化项,使收敛因子在某些阶段发生反复或突变。

这一改进使得收敛因子在早期阶段保持较大值,强化全局搜索能力;在后期逐渐减小,从而加速局部搜索并提高收敛速度。本文提出的改进鲸鱼算法简称为 WOAimp。

3.3 算法性能验证

为验证改进鲸鱼算法性能,选用 CEC2008F1 函数、CEC2017F3 函数、CEC2017F5 函数、CEC2017F13 函数、CEC2017F15 函数、CEC2017F17 函数进行性能验证^[18,23]。测试算法包括:改进鲸鱼算法(WOAimp)、鲸鱼算法^[18](WOA)、遗传算法^[23](GA)、差分进化算法^[20](DE)、粒子群优化算法^[22](PSO)、蚁群优化算法^[13](ACO)。设定种群个数为 100,迭代次数为 100。上述测试在搭载 AMD Ryzen 5 5600U 处理器(主频 3.3 GHz)的电脑中进行。各算法的迭代收敛曲线见图 3。

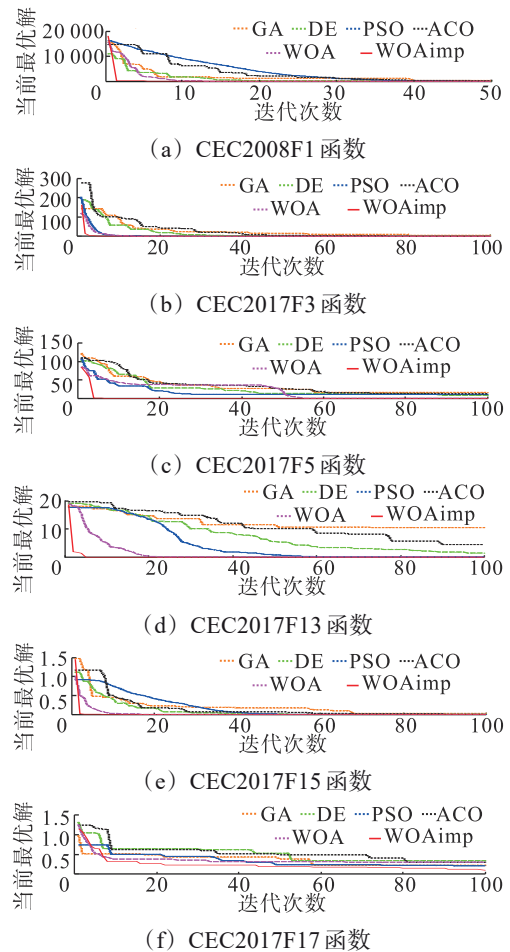


图3 测试函数运行结果

Fig.3 result of running on the test function

由图3可知,WOAimp收敛速度更快,平均迭代次数减少了46.9%。在寻优效果上明显优于其他算法。

4 算例

结合河北雄安某地商办园区源网荷储系统的实际情况,通过仿真分析验证本文所提方法在系统优化效果上的应用与影响。仿真验证所需的具体参数参照文献[24]和文献[25]设置。

4.1 基础数据

(1) 分时电价与气价情况

该园区的分时电价与气价见图4。其中,24小时分时电价如下:低谷时段(0:00—4:00和20:00—23:00)为0.38元/(kW·h),平时段(5:00—6:00和9:00—15:00)为0.72元/(kW·h),高峰时段(7:00—8:00和18:00—19:00)为1.06元/(kW·h),特别高峰时段(16:00—17:00)为1.31元/(kW·h)。同时,园区执行固定气价每立方米0.32元。

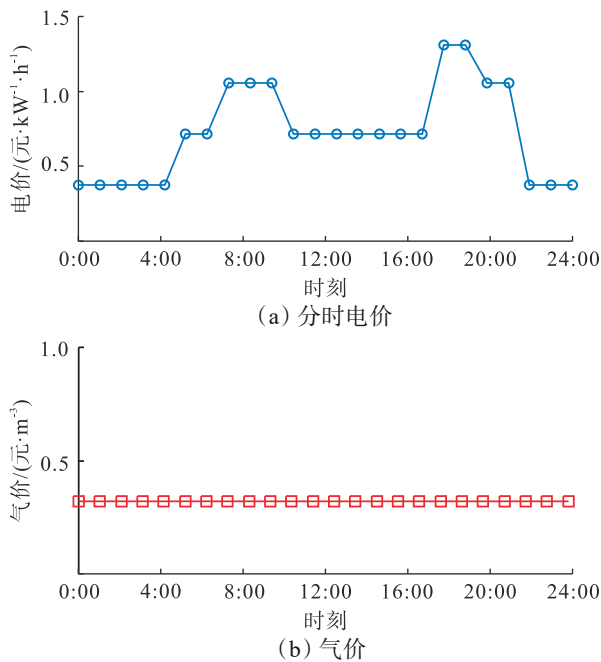


图4 分时电价与气价

Fig. 4 time-of-use electricity prices and gas prices

(2) 冷热电负荷情况

不同季节的负荷情况见图5。可知,该园区能源负荷具有显著的季节性和时段性:夏季电负荷和冷负荷较高,午后和傍晚为高峰;冬季以电负荷和热负荷为主,热负荷集中在早晚;过渡季节各类负荷相对均衡,电负荷略高,冷热负荷随气温波动。园区能源需求受季节和时间变化影响显著,需采用针对性优化策略。

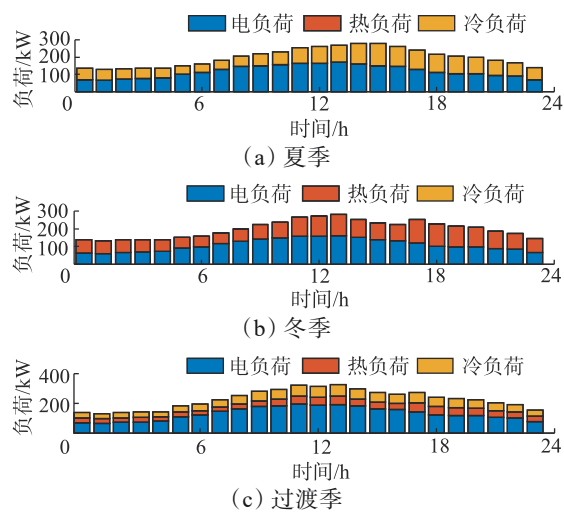


图5 不同季节的负荷情况

Fig.5 load profiles in different seasons

4.2 不同求解算法性能对比

为验证WOAimp算法性能,6种算法在经济成本与碳排放方面的优化结果见表1。结果显示,WOAimp在经济成本、弃风率、弃光率和CO₂减排量方面均优于其他算法,实现了更优的低碳调度效果。

表1 6种算法的经济成本与碳排放量

Tab.1 economic costs and carbon emissions of the six algorithms

求解方法	经济成本/元	弃风率	弃光率	CO ₂ 减排量/kg
GA ^[14,23]	5 452.83	0.14	0.08	722.15
DE ^[20]	5 428.77	0.11	0.10	730.61
PSO ^[15,22]	5 411.23	0.13	0.11	720.30
ACO ^[13]	5 501.65	0.10	0.09	735.42
WOA ^[18-19]	5 495.38	0.12	0.08	727.89
WOAimp	5 405.14	0.11	0.07	745.99

6种算法的迭代曲线见图6。可见,WOAimp算法的收敛速度和求解效率最高。

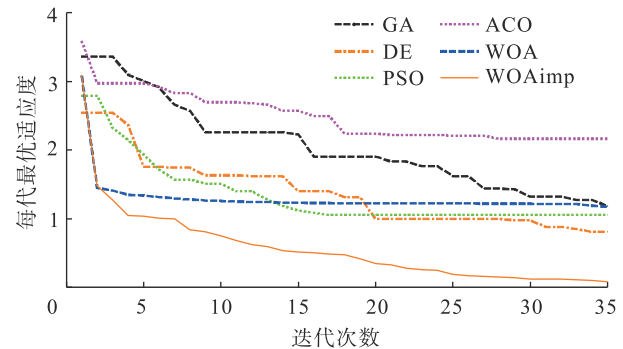


图6 6种算法的迭代曲线

Fig.6 iteration curves for the six algorithms

4.3 不同季节优化前后对比

为验证 WOAimp 方法的有效性, 对比优化前后不同季节的能源使用情况, 结果见图 7~图 9。

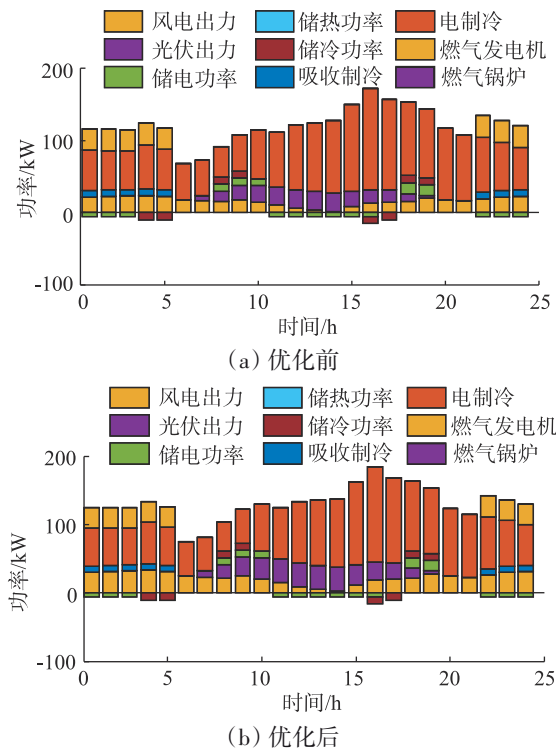


图 7 夏季优化前后对比
Fig.7 comparison of pre- and post-summer optimization

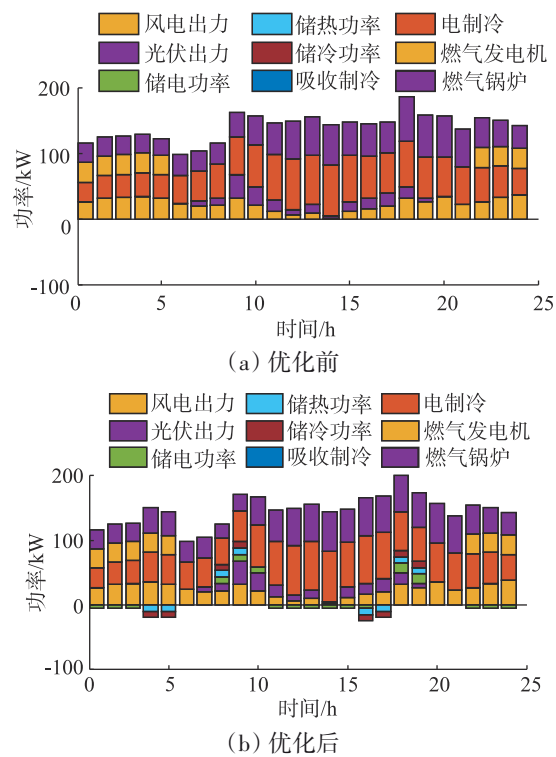


图 8 冬季优化前后对比
Fig.8 comparison of pre- and post-winter optimization

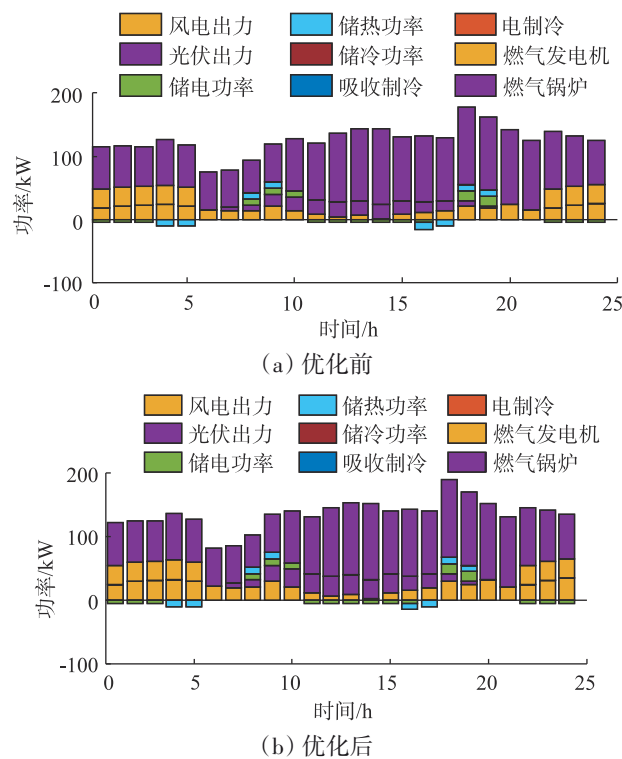


图 9 过渡季节优化前后对比
Fig.9 comparison of pre- and post-transitional season optimization

图 7~图 9 中, 纵坐标正值代表输出功率, 负值代表存储功率。经过分析可得, 优化后各季节的购电量与购气量均有所下降, 特别是在高峰时段, 购电成本显著降低。夏季以电负荷和冷负荷为主且水平较高, 优化使高峰电负荷显著降低; 冬季以电负荷和热负荷为主, 优化提升了热负荷管理效率, 降低了电力消耗; 过渡季负荷相对均衡, 优化使电负荷分配更合理, 避免了高峰时段的能源浪费。整体来看, 优化策略通过负荷调控与能量协调, 显著提升了能源利用效率并降低了成本。优化前后的经济成本、弃风率、弃光率以及 CO₂ 减排量对比结果见表 2。

表 2 不同季节优化前后的能源效率和减排指标对比
Tab.2 comparison of energy efficiency and emission reduction indicators before and after optimization in different seasons

季节	优化情况	成本/元	弃风率	弃光率	CO ₂ 减排量/kg
夏季	优化前	6 108.520	0.40	0.35	499.56
	优化后	5 734.326	0.15	0.10	701.60
冬季	优化前	3 649.645	0.38	0.32	477.21
	优化后	3 312.429	0.13	0.09	658.04
过渡	优化前	6 334.055	0.42	0.30	422.47
	优化后	5 869.056	0.15	0.07	618.77

由表2可见,优化后的经济成本、弃风率和弃光率在均显著降低,CO₂减排量增加。夏季、冬季和过渡季变化趋势相同,验证了所提优化方法在提升能源利用效率、降低排放方面的有效性及其推广应用价值。

4.4 不同约束条件和目标函数对比

为验证本文方法在不同约束与目标函数下的有效性,基于冬季运行数据,设计4种对比方案,并从经济成本、弃风率、弃光率和CO₂减排量4个方面进行评估,结果见表3。方案1未设置零碳路径约束与绿电指数目标,仅以传统能源价格优化能源成本;方案2参考文献[24],以经济性为唯一目标,不考虑碳排放与绿色电力;方案3参考文献[25],在追求经济性的基础上增加了系统安全性目标;方案4为本文所提方法,综合考虑经济性、绿电指数与碳排放目标,通过多目标优化实现经济与环保的平衡。

表3 不同方案经济与环境收益对比
Tab. 3 comparison of economic and environmental benefits of different scenarios

方案	成本/元	弃风率	弃光率	CO ₂ 减排量/kg
1	3 412.43	0.20	0.15	608.78
2	3 152.68	0	0	745.10
3	3 345.52	0.15	0.12	640.95
4	3 312.42	0.13	0.09	658.40

由表3可见,方案2的经济成本最低,但因忽略系统安全性,实际应用受限。方案4在维持较低经济成本的同时,兼顾环保与安全,综合表现最佳。在弃风率、弃光率和CO₂减排量方面,方案4均优于其他方案,显著提升了可再生能源利用效率并降低了碳排放,验证了本文优化方法的有效性。

综上所述,通过对比4种不同方案在经济成本、弃风率、弃光率和CO₂减排量等方面的表现,本文提出的综合优化方法,在不同季节和不同约束条件下均能有效提升能源利用效率、降低经济成本、减少碳排放,具有较高的实际应用价值。

5 结论

本文提出一种基于零碳路径约束的源网荷储系统柔性互动降碳优化策略,融合绿电指数构建、系统协同建模与改进鲸鱼优化算法,实现低碳与经济性的有效平衡。研究表明,该方法在协调源网荷储各侧能量流的同时,提升了系统运行效率与减碳效果,为低碳调度提供了技术支撑。所提

出的改进鲸鱼优化算法通过引入加权个体与自适应收敛因子,有效增强了模型求解效率。

参考文献(References):

- [1] 吴凯槟,邱泽晶.基于量子万有引力算法的多能联合系统优化调度[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2024,43(6):733-741.
WU Kaibin, QIU Zejing. Optimization scheduling for a multi-energy joint system based on a quantum universal gravity algorithm [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2024, 43(6): 733-741.
- [2] 刘青,李亮,王宇,等.含需求响应与碳配额的综合能源系统优化调度[J].西安科技大学学报,2023,43(4):787-796.
LIU Qing, LI Liang, WANG Yu, et al. Optimal scheduling of integrated energy system with demand response and carbon quotas [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2023, 43(4): 787-796.
- [3] ZHANG Z D, DAI H C, JIANG D G, et al. Multi-objective operation rule optimization of wind-solar-hydro hybrid power system based on knowledge graph structure[J]. Journal of Cleaner Production, 2025, 486: 144514.
- [4] REN Z L, YU Q W, LIN D, et al. Optimal capacity configuration of a wind-solar-battery-diesel microgrid system using continuous grey wolf optimization[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 113: 115630.
- [5] VERMA D, SONI J, BHATTACHARJEE K. A novel artificial electric field strategy for economic load dispatch problem with renewable penetration[J]. Evolutionary Intelligence, 2024, 17(5): 3593-3608.
- [6] CHEN J F, LI K, WANG H Y, et al. Distributed parallel optimal operation for shared energy storage system-multiple park integrated energy system based on ADMM[J]. Energy, 2025, 317: 134677.
- [7] WANG F Y, WANG W Q. Optimal scheduling of zero-carbon parks considering flexible response of source-load bilaterals in multiple timescales[J]. Processes, 2024, 12(12): 2850.
- [8] MISHRA M, MAHAJAN P, GARG R. Novel version of horse herd optimization for enhancing electric load forecasting capabilities of neural networks[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2025: 1-18.
- [9] 杨颖钊.基于大数据分析的电网负荷预测优化算法研究[J].科技创新与应用,2025,15(4):98-101.
YANG Yingzhao. Research on optimization algorithm of power grid load forecasting based on big data analysis[J]. Technology Innovation and Application, 2025, 15(4): 98-101.
- [10] ZHANG G, LI Y C, XIE T, et al. Two-stage rolling optimization operation strategy for microgrid considering BESU state[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2025, 165: 110497.
- [11] GAO P, DENG Z F, QI X L, et al. Multi-objective day-ahead optimization of distribution system considering low carbon and demand response with EV cluster[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2025, 165: 110493.
- [12] İSÇAN S, ARİKAN O. Optimizing battery energy storage system

- for campus micro grid: economic and environmental benefits of strategic sizing[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 124: 116905.
- [13] CORTÉS-CAICEDO B, GRISALES-NOREÑA L F, MONTROYA O D, et al. A multi-objective optimization approach based on the Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II for power coordination in battery energy storage systems for DC distribution network applications[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 113: 115430.
- [14] 李媛, 李贞涛, 张国军, 等. 基于改进NSGA-2-DE算法的综合能源系统运行优化[J]. *沈阳工业大学学报*, 2022, 44(5): 488-495.
- LI Yuan, LI Zhentao, ZHANG Guojun, et al. Optimization of integrated energy system operation based on improved NSGA-2-DE algorithm[J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2022, 44(5): 488-495.
- [15] 韩忠华, 富若涵, 卢铁林. 基于改进鲸鱼算法的建筑构件生产线主计划编制方法[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2024, 40(6): 1116-1125.
- HAN Zhonghua, FU Ruohan, LU Tielin. Master planning method of building component production line based on improved whale algorithm[J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 2024, 40(6): 1116-1125.
- [16] 李斌, 李岩, 刘佳鑫. 基于改进粒子群算法的综合能源系统经济优化运行[J]. *电工技术*, 2023(2): 153-157.
- LI Bin, LI Yan, LIU Jiaxin. Economic optimization operation of integrated energy system based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. *Electric Engineering*, 2023(2): 153-157.
- [17] GAO Z P, FAN A J, HAN J, et al. A novel power source-load bilayer cooperative planning method for distribution networks based on adaptive ε -dominated multi-objective particle swarm algorithm[J]. *Energy Reports*, 2025, 13: 1971-1979.
- [18] GÜVEN A F, HASSAN M H, KAMEL S. Optimization of a hybrid microgrid for a small hotel using renewable energy and EV charging with a quadratic interpolation beluga whale algorithm[J]. *Neural Computing and Applications*, 2025, 37(5): 3973-4008.
- [19] SUN Y J, WANG X L, CHEN Y H, et al. A modified whale optimization algorithm for large-scale global optimization problems[J]. *Expert Systems with Applications*, 2018, 114: 563-577.
- [20] MIRJALILI S, LEWIS A. The whale optimization algorithm[J]. *Advances in Engineering Software*, 2016, 95: 51-67.
- [21] KHADANGA R K, KUMAR A, PANDA S. A novel modified whale optimization algorithm for load frequency controller design of a two-area power system composing of PV grid and thermal generator[J]. *Neural Computing and Applications*, 2020, 32(12): 8205-8216.
- [22] MA K Q, WU C X, HUANG Y G, et al. Oil well productivity capacity prediction based on support vector machine optimized by improved whale algorithm[J]. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2024, 14(12): 3251-3260.
- [23] BANSAL S, AGGARWAL H. An efficient workflow scheduling in cloud - fog computing environment using a hybrid particle whale optimization algorithm[J]. *Wireless Personal Communications*, 2024, 137(1): 441-475.
- [24] GOLMAEI S M, VAHIDI J, JAMSHIDI M. Whale algorithm for schedule optimization of construction projects employing building information modeling[J]. *Engineering Reports*, 2025, 7(3): e70022.
- [25] YANG H F, YANG S Y, MENG D B, et al. Optimization of analog circuit parameters using bidirectional long short-term memory coupled with an enhanced whale optimization algorithm[J]. *Mathematics*, 2025, 13(1): 121.