

基于改进灰狼优化算法的多区域虚拟电厂协调优化调度技术

戴观权¹, 潘凯岩², 蔡莹¹, 林国彪², 曾顺奇¹, 黄宇翔³, 刘晓婕²

(1.广东电网有限责任公司广州供电局, 广东 广州 518000; 2.东方电子股份有限公司, 山东 烟台 264000; 3.华南理工大学, 广东 广州 510641)

摘要:为促进“双碳”目标的实现,通过电力低碳化的方式对不同地区虚拟电厂中分布式新能源进行协调优化调度,提出基于灰狼优化算法的多区域虚拟电厂协调优化调度技术。首先,构建经济效益最优的运行优化模型,将不同区域虚拟电厂分布式新能源互联,联合调度风、光发电机组与碳捕集机组;其次,由于构建的模型具有求解难度大、非线性强、维度高的问题,因此利用灰狼优化算法搜索效率高、收敛速度快、优化参数少的优点,对模型进行寻优求解,与此同时,提出了一种改进灰狼优化算法,提高了算法的全局寻优能力,解决了算法后期容易出现早熟以及局部最优的问题;最后,经过仿真分析,验证了所提方法能够实现不同地区虚拟电厂优化调度,降低了其碳排放量和净成本。

关键词: 电力低碳; 虚拟电厂; 分布式新能源; 灰狼优化算法; 优化调度

中图分类号: TK51; TK81; TM6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2024)12-1681-08

0 引言

随着我国实现“双碳”目标进程的逐步推进,使用低碳化清洁能源替代高碳化火力发电成为未来能源产业发展的主要趋势^[1-3]。将火力发电机组改成碳捕集机组能够促进电力低碳化进程,并且碳捕集机组具有调节快速、运行灵活的优势,有利于同随机波动的分布式新能源相互配合运行。因此,发展风、光发电机组和碳捕集机组调节系统具有重要意义。然而,由于分布式新能源位置分散、运行独立、协调不足,容易出现资源分配不合理的现象^[4]。虚拟电厂是一种聚合不同地区分布式电源的先进技术,能够实现不同分布式电源之间的优化调度,具有很好的经济效益和社会效益,因此被越来越多的学者所关注^[5]。

虚拟电厂优化调度技术研究已经取得了一定的成果。文献[6]定义虚拟电厂由风电机组和碳捕集机组组成,具有很好的经济效益和环保效益。文献[7]提出基于储液碳捕集电厂的调度方法,构建储液碳捕集电厂模型,安装液体存储装置,实现资源优化调度。文献[8]提出包含碳捕集机组的低碳调度模型,降低了系统碳排放量以及

运行成本,有利于实现碳循环。文献[9]提出基于风力发电机组、光伏发电机组、火力发电机组、柴油机组的能量市场,构建虚拟电厂最优经济运行的多目标优化调度模型。

虚拟电厂优化调度问题本质上是一个目标优化问题,近年来,快速发展的智能算法已经在虚拟电厂领域得到了一些深入应用。文献[10]构建了碳排放量 and 经济最优的多目标函数进行虚拟电厂优化调度,使用增广 ϵ -约束方法将多目标问题转换成单目标问题。文献[11]将免疫量子粒子群算法应用于虚拟电厂博弈中,提高了电厂的经济收益。文献[12]构建风-光-水-碳捕集虚拟电厂调度模型,使用分子微分进化算法求解模型,取得了较好的经济效益和环境效益。

随着分布式新能源大规模接入电网,虚拟电厂优化调度模型求解难度更大,维度更多,对目标优化算法的要求更高^[13]。因此,本文提出一种基于改进灰狼优化算法的多区域虚拟电厂协调优化调度技术,构建经济效益最优的运行优化模型,利用灰狼优化算法对模型进行寻优求解。经过仿真分析,验证了本文所提方法能够实现不同区域虚拟

收稿日期: 2023-11-24。

基金项目: 南方电网公司科技项目(030108KK52220005/GDKJXM20220333)。

作者简介: 戴观权(1993-),男,广东茂名,硕士,工程师,研究方向为电力调度运行、虚拟电厂。E-mail: kb_dai@163.com

电厂优化调度,降低了其碳排放量和净成本。

1 多区域虚拟电厂结构

1.1 多区域虚拟电厂组成结构

图1为虚拟电厂基本结构,主要包含虚拟电厂协调控制中心、各种分布式电源以及负荷需求。安装碳捕集装置的热电厂能够通过烟气旁路系统对二氧化碳进行捕集控制,使得发电厂的出力与碳排放量得到控制,进而提升虚拟电厂灵活控制能力,有利于进一步消纳新能源。负荷需求侧利用不同价格响应在虚拟电厂中起到一定的削峰填谷的作用。锅炉能够提高热电机组调峰空间,进而提高虚拟电厂调峰能力。协调控制中心对电源侧和负荷侧进行协调控制,目的是提升新能源消纳能力,增加虚拟电厂经济效益与减少碳排放量。

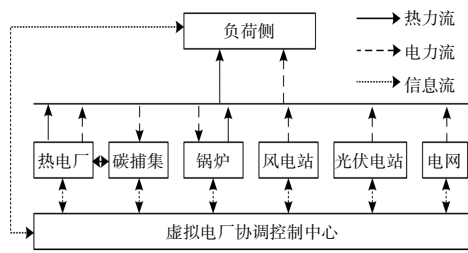


图1 虚拟电厂结构

Fig.1 Virtual power plant structure

多区域虚拟电厂结构如图2所示。虚拟电厂协调控制中心能量管理系统控制各个单元,收集能量集线器和能量市场所有信息,预测电价、负荷以及新能源出力,最后通过预测结果和集线器信息制定控制策略,将运行指令发送到各个单元。某一个地区能量出现不足时,其他区域通过互联方式对此区域进行供电。

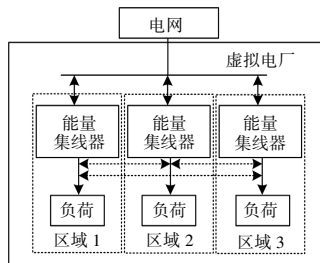


图2 多区域虚拟电厂结构

Fig.2 Multi regional virtual power plant structure

1.2 碳捕集装置

碳捕集设备的二氧化碳分离过程如图3所示。虚拟电厂控制热电联产机组排放至二氧化碳

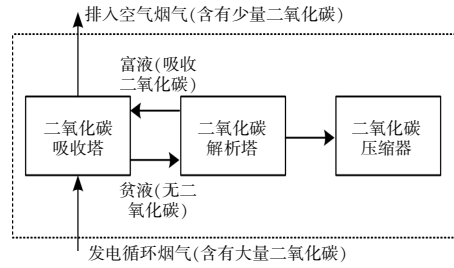


图3 碳捕集设备原理

Fig.3 Principles of carbon capture equipment

吸收塔的烟气量,实现设备能耗的控制,提高虚拟电厂调峰宽度,降低弃光、弃风的损失,增加虚拟电厂的收益。

2 虚拟电厂优化调度模型

2.1 目标函数

以虚拟电厂一日内经济效益最高为目标,搭建的优化调度模型函数如下:

$$F = \sum_{k=1}^{24} (I_{\text{sale}}^k + C_Y^k - C_Q^k - C_L^k - C_{\text{FQ}}^k - C_{\text{PV}}^k - C_{\text{WD}}^k - C_S^k - C_{\text{CB}}^k - C_{\text{CS}}^k) - C_{\text{epom}} - C_{\text{ep}} - C_{\text{chsom}} - C_{\text{chs}} \quad (1)$$

式中: F 为虚拟电厂收益; k 为调度时刻,取值为1~24;其他符号含义如下。

①第 k 时刻虚拟电厂售电收益 I_{sale}^k

$$I_{\text{sale}}^k = \alpha(k) \left(\sum_{i \in \theta} P_{\text{CHP}}^{i,k} + P_{\text{PV}}^k + P_{\text{WD}}^k - P_{\text{EH}}^k - P_Q^k - P_{\text{CCS}}^k \right) + \beta(k) \left(\sum_{i \in \theta} H_{\text{CHP}}^{i,k} + H_{\text{EH}}^k \right) \quad (2)$$

式中: $\alpha(k)$ 为第 k 时刻虚拟电厂售电价格; $P_{\text{CHP}}^{i,k}$ 为第 k 时刻第 i 个热电联产机组出力; P_{PV}^k 为第 k 时刻光伏电站出力; P_{WD}^k 为第 k 时刻风电厂出力; P_{EH}^k 为第 k 时刻锅炉的电热功率; P_Q^k 为第 k 时刻的弃风和弃光功率; P_{CCS}^k 为第 k 时刻碳捕集装置能耗; $\beta(k)$ 为第 k 时刻虚拟电厂供热价格; $H_{\text{CHP}}^{i,k}$ 为第 k 时刻第 i 个热电联产机组热出力; H_{EH}^k 为第 k 时刻锅炉的供热功率。

②第 k 时刻虚拟电厂进行碳交易的收益 C_Y^k

$$\begin{cases} C_Y^k = k_Y (E_q^k - E_c^k) \\ E_q^k = \delta_h (H_{\text{CHP}}^k + \varphi P_{\text{CHP}}^k) \\ E_c^k = E_{\text{CHP}}^k - E_{\text{CCS}}^k \end{cases} \quad (3)$$

式中: k_V 为碳的交易价格; E_q^k 为第 k 时刻虚拟电厂碳排放分配量; E_c^k 为第 k 时刻碳捕集机组碳排放量; δ_h 为平均供热碳排放分配容量; φ 为发电转换成供热的折算系数; E_{CHP}^k 为第 k 时刻热电联产机组碳排放量; E_{CCS}^k 为第 k 时刻碳捕集机组捕集的二氧化碳量。

③第 k 时刻虚拟电厂弃风、弃光的惩罚成本 C_Q^k

$$C_Q^k = k_Q \max \left(\sum_{i \in \theta} P_{CHP}^{i,k} + P_{PV}^k + P_{WD}^k - P_{EH}^k - P_t^k - P_{CCS}^k, 0 \right) \quad (4)$$

式中: k_Q 为虚拟电厂弃风、弃光时的惩罚参数; P_t^k 为用户第 k 时刻的负荷。

④第 k 时刻虚拟电厂失去负荷的惩罚成本 C_L^k

$$C_L^k = k_L \max [P_t^k - (\sum_{i \in \theta} P_{CHP}^{i,k} - P_{PV}^k - P_{WD}^k + P_{EH}^k + P_{CCS}^k), 0] \quad (5)$$

式中: k_L 为虚拟电厂失去负荷时的惩罚系数。

⑤第 k 时刻碳捕集机组二氧化碳封存成本 C_{FQ}^k

$$C_{FQ}^k = k_{FQ} E_{CCS}^k \quad (6)$$

式中: k_{FQ} 为碳捕集机组二氧化碳封存成本系数。

碳捕集机组能耗计算式如下:

$$\begin{cases} P_{CCS}^k = P_B + P_R^k \\ P_R^k = w_c E_{CCS}^k \end{cases} \quad (7)$$

式中: P_B 为碳捕集机组固定能耗,是一个大小不变的定值; P_R^k 为第 k 时刻碳捕集机组运行时的能耗,通过二氧化碳捕集量进行计算; w_c 为处理每单位容量二氧化碳的能耗。

⑥第 k 时刻光伏发电成本 C_{PV}^k

$$C_{PV}^k = c_{PV} P_{PV}^k \quad (8)$$

式中: c_{PV} 为单位容量光伏发电成本。

⑦第 k 时刻风力发电成本 C_{WD}^k

$$C_{WD}^k = c_{WD} P_{WD}^k \quad (9)$$

式中: c_{WD} 为单位容量风力发电成本。

⑧第 k 时刻碳捕集机组溶剂损耗成本 C_S^k

$$C_S^k = k_s v E_{CCS}^k \quad (10)$$

式中: k_s, v 分别为溶剂成本系数和损耗系数。

⑨第 k 时刻虚拟电厂环保成本 C_{CB}^k

$$C_{CB}^k = \sum_{j=1}^m [v_{ej} d_{ej} \sum_{i \in \theta} (P_{CHP}^{i,k} + H_{CHP}^{i,k}) + v_j] \quad (11)$$

式中: m 为污染物种类; v_{ej} 为治理第 j 个污染物时的成本; d_{ej} 为第 j 个污染物在单位热电机出力时的排放量; v_j 为排放第 j 个污染物时的惩罚系数。

⑩第 k 时刻碳捕集机组损耗的煤成本 C_{CS}^k

$$C_{CS}^k = \sum_{i \in \theta} \psi [c_0 + c_1 P_{CHP}^{i,k} + c_2 H_{CHP}^{i,k} + c_3 (P_{CHP}^{i,k})^2 + c_4 P_{CHP}^{i,k} H_{CHP}^{i,k} + c_5 (H_{CHP}^{i,k})^2] \quad (12)$$

式中: c 为煤损耗拟合系数; ψ 为煤单价。

⑪锅炉每日运行维护成本 C_{epom}

$$C_{epom} = \frac{\rho_E V_E \delta}{365} \quad (13)$$

式中: ρ_E 为单位容量锅炉建设成本; V_E 为锅炉装机容量; δ 为锅炉每年运行维护成本占比。

⑫锅炉每日折旧成本 C_{ep}

$$C_{ep} = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \frac{\rho_E V_E}{365} \quad (14)$$

式中: r 为投资时贷款利率。

⑬碳捕集机组每日运行维护成本 C_{chsom}

$$C_{chsom} = \frac{\chi}{1-\chi} (C_{chs} + \sum_{k=1}^{24} C_{CS}^k) \quad (15)$$

式中: χ 为碳捕集机组每年运行维护成本占比。

⑭碳捕集机组每日折旧成本 C_{chs}

$$C_{chs} = \frac{\rho_c V_c}{365n(1-s)} (1+18.6\%) \quad (16)$$

式中: n 为碳捕集机组折旧的年限; ρ_c 为单位容量碳捕集机组建设成本; V_c 为碳捕集机组装机容量; s 为线路损耗率;18.6%为添加碳捕集机组后系统成本增加比例。

2.2 约束条件

①功率平衡

$$P_{iPDR}^k = \sum_{i \in \theta} P_{CHP}^{i,k} + P_{PV}^k + P_{WD}^k - P_{EH}^k - P_{CCS}^k \quad (17)$$

式中： P_{iPDR}^k 为第 k 时刻考虑价格需求响应后的负荷功率。

② 价格需求响应

价格需求响应负荷容量维持不变，表达式如下：

$$\sum_{k=1}^{24} P_{iPDR}^k = \sum_{k=1}^{24} P_t^k \quad (18)$$

式中： P_t^k 为第 k 时刻考虑价格需求响应前的负荷功率。

价格需求响应须要考虑用户满意和用电方式，表达式如下：

$$\left\{ \begin{aligned} 1 - \frac{\sum_{k=1}^{24} |P_{iPDR}^k - P_t^k|}{\sum_{k=1}^{24} P_t^k} &\geq M_{\min}^u \\ 1 + \frac{\sum_{k=1}^{24} (P_t^k D_t^k - P_{iPDR}^k D_{iPDR}^k)}{\sum_{k=1}^{24} (P_t^k D_t^k)} &\geq M_{\min}^p \end{aligned} \right. \quad (19)$$

式中： M_{\min}^u, M_{\min}^p 分别为用电方式和满意度最小值； D_t^k, P_t^k 分别为第 k 时刻考虑价格需求响应前、后的电价。

③ 热电联产机组出力爬坡

$$\left\{ \begin{aligned} P_{CHP}^{i,\min} &\leq P_{CHP}^{i,k} \leq P_{CHP}^{i,\max} \\ H_{CHP}^{i,\min} &\leq H_{CHP}^{i,k} \leq H_{CHP}^{i,\max} \\ -R_{CHP}^{i,\downarrow} &\leq P_{CHP}^{i,k} - P_{CHP}^{i,(k-1)} \leq R_{CHP}^{i,\uparrow} \end{aligned} \right. \quad (20)$$

式中： $P_{CHP}^{i,\min}, H_{CHP}^{i,\min}, R_{CHP}^{i,\uparrow}$ 分别为第 i 个热电联产机组电功率、热功率、爬坡率最小值； $P_{CHP}^{i,\max}, H_{CHP}^{i,\max}, R_{CHP}^{i,\downarrow}$ 分别为第 i 个热电联产机组电功率、热功率、爬坡率最大值。

④ 锅炉热电转换

$$H_{EH}^k = \eta P_{EH}^k \quad (21)$$

式中： η 为热电转换效率。

⑤ 锅炉容量

$$0 \leq H_{EH}^k \leq H_{EH} \quad (22)$$

⑥ 碳捕集机组碳捕集量

$$\eta_{\min} E_{CHP}^k \leq E_{CCS}^k \leq \eta_{\max} E_{CHP}^k \quad (23)$$

式中： η_{\min}, η_{\max} 分别为碳捕集机组碳捕集率最小值、最大值。

⑦ 供热平衡

$$\sum_{i \in \theta} H_{CHP}^{i,k} + H_{EH}^k = H_t^k \quad (24)$$

式中： H_t^k 为第 k 时刻热负荷功率。

3 模型求解

上述虚拟电厂优化调度模型求解难度大、非线性强、维度高，本文利用灰狼优化算法搜索效率高、收敛速度快、优化参数少的优点，对模型进行寻优求解。同时，利用收敛因子衰减和变异策略对灰狼算法进行改进，提出了一种改进灰狼优化算法，提高了算法的全局寻优能力，解决了算法后期容易出现早熟以及局部最优的问题。

3.1 基本离散灰狼优化算法

灰狼算法是模仿灰狼种群等级制度和狩猎行为的寻优算法，具有算法稳定、参数少的优点^[14]。灰狼的等级制度如图 4 所示，根据等级地位分成 $\alpha, \beta, \delta, \omega$ 4 种级别，分别为算法结果的最优解、次优解、次次优解以及负责搜索的种群。算法的原则是高级别的狼指导低级别的狼进行搜索，如果达到最大迭代次数， α 就是最优解。

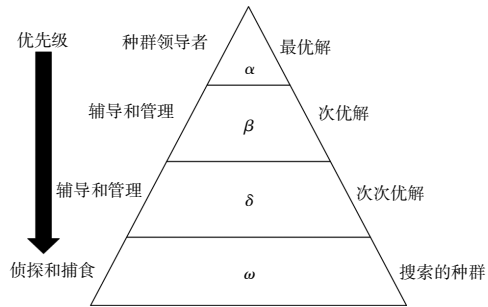


图 4 灰狼算法的等级制度

Fig.4 The hierarchical system of grey wolf algorithm

灰狼狩猎是以包围猎物的方式进行搜索，找到最优的狩猎路线，整个行为的模型如下：

$$\left\{ \begin{aligned} \vec{D} &= \left| \vec{C} \cdot \vec{X}_p(m) - \vec{X}(m) \right| \\ \vec{X}(m+1) &= \vec{X}_p(m) - \vec{A} \vec{D} \end{aligned} \right. \quad (25)$$

式中： \vec{D} 为灰狼同猎物之间的距离； \vec{X}_p 为猎物当前的位置； \vec{X} 为灰狼的位置； m 为迭代次数； \vec{A}, \vec{C} 为协同相量。

$$\begin{cases} \vec{A}=2a\vec{r}_1-a \\ \vec{C}=2\vec{r}_2 \end{cases} \quad (26)$$

式中: \vec{a} 为收敛因子,随着迭代次数增多由 2 变成 0; \vec{r}_1, \vec{r}_2 均为 0~1 的随机数。

灰狼狩猎过程是由高级别的狼主导, ω 狼跟随搜索,在狩猎行为的推进中, ω 狼慢慢向高级别的狼靠近。算法的迭代过程如下:

$$\begin{cases} \vec{D}_\alpha = |\vec{C}_1 \cdot \vec{X}_\alpha - \vec{X}| \\ \vec{D}_\beta = |\vec{C}_2 \cdot \vec{X}_\beta - \vec{X}| \\ \vec{D}_\delta = |\vec{C}_3 \cdot \vec{X}_\delta - \vec{X}| \end{cases} \quad (27)$$

$$\begin{cases} \vec{X}_1 = |\vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 \cdot \vec{D}_\alpha| \\ \vec{X}_2 = |\vec{X}_\beta - \vec{A}_2 \cdot \vec{D}_\beta| \\ \vec{X}_3 = |\vec{X}_\delta - \vec{A}_3 \cdot \vec{D}_\delta| \end{cases} \quad (28)$$

$$\vec{X}(m+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \quad (29)$$

式中: \vec{X}_α 为 α 狼的位置; \vec{D}_α 为 α 狼和 ω 狼的距离; \vec{X}_β 为 β 狼的位置; \vec{D}_β 为 β 狼和 ω 狼的距离; \vec{X}_δ 为 δ 狼的位置; \vec{D}_δ 为 δ 狼和 ω 狼的距离; \vec{X} 为 ω 狼的位置。

3.2 灰狼优化算法性能提升

灰狼算法有时候会出现局部最优的问题,降低了算法的精度。通过收敛因子衰减和变异策略对灰狼算法进行改进,可提升算法的精度,并且和原算法参数保持一致,仍然具有参数少的优点。

3.2.1 收敛因子衰减

收敛因子 \vec{a} 的大小能够直接影响算法的全局搜索能力,使用指数衰减函数可得出收敛因子 \vec{a} ,替代原有灰狼算法的线性衰减方式:

$$\vec{a} = 2 \left(1 - \frac{m}{M} \right)^2 \quad (30)$$

式中: M 为最大迭代次数。

由式(30)可知,收敛因子 \vec{a} 随着迭代次数的增加呈非线性衰减,能够有效平衡整个算法的全局最优和局部最优。

3.2.2 变异的方式

为了解决灰狼算法局部最优的问题,并且保持原来的参数量,对式(29)灰狼位置进行高斯变异:

$$\vec{X}(m+1) = \vec{X}(m+1) \cdot \left[1 + \frac{\vec{a}}{2} \cdot N(0,1) \right] \quad (31)$$

式中: $N(0,1)$ 为标准的高斯分布。

通过这种方式能够使得灰狼算法在初期提高扰动,增强算法的全局搜索能力,在末期降低扰动,防止最优解波动,进而加快算法收敛速度。

3.3 基于改进灰狼优化算法的多区域虚拟电厂协调优化调度模型求解过程

以虚拟电厂一日内经济效益最高为目标,基于约束条件和改进灰狼优化算法建立多区域虚拟电厂协调优化调度模型,求解流程如图 5 所示,整个计算过程如下。

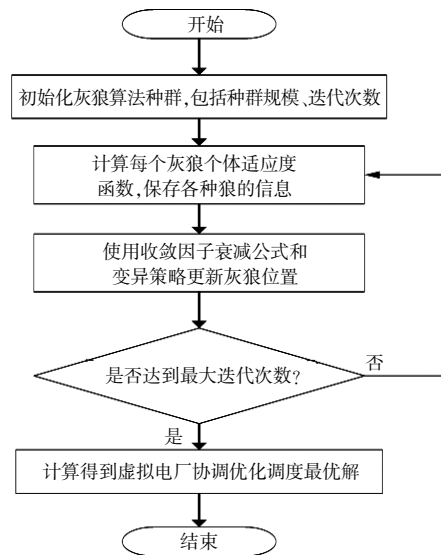


图 5 模型求解流程
Fig.5 Model solving process

步骤一:初始化灰狼算法种群,包括种群规模、迭代次数。

步骤二:计算每个灰狼个体适应度函数,保存适应度最好的 α, β, δ 狼的信息。

步骤三:使用收敛因子衰减公式和变异策略更新灰狼位置。

步骤四:判断是否达到最大迭代次数,如果没有,则转到步骤二;如果达到最大迭代次数,则转到下一步。

步骤五:计算得到虚拟电厂协调优化调度最优解。

4 仿真验证

4.1 系统参数

虚拟电厂各个发电机装机容量: 风力发电机 300 MW、光伏电站 90 MW、热电联产机组 400 MW, 光伏电站和风力发电机实际出力和预测出力如图 6, 7 所示。虚拟电厂售热单价为 100 元/(MW·h)。需求侧负荷采用分段电价: 峰时段单价为 850 元/(MW·h), 谷时段单价为 180 元/(MW·h), 其他时段单价为 500 元/(MW·h), 其中峰时段为 09:00-12:00, 18:00-21:00, 谷时段为 23:00-07:00。

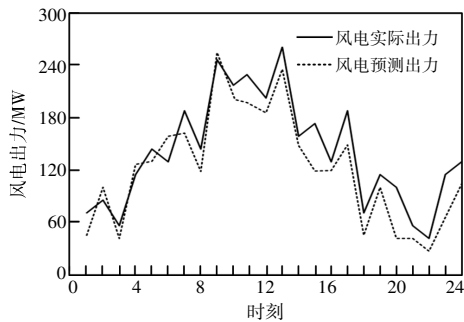


图 6 风电出力

Fig.6 Wind power output

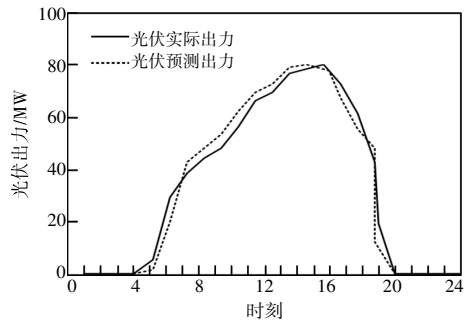


图 7 光伏出力

Fig.7 Photovoltaic power output

3 个区域虚拟电厂用户侧负荷功率如图 8 所示。失负荷时的惩罚系数设置为 5 倍实时电价, 弃

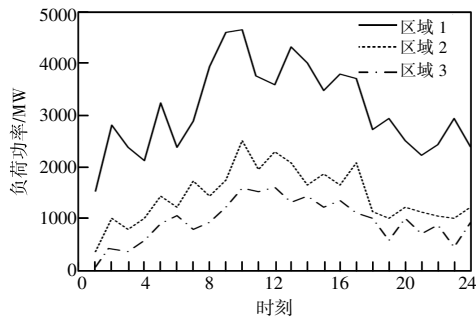


图 8 不同区域负荷功率

Fig.8 Load output in different regions

风惩罚系数设置为 260 元/(MW·h); 碳捕集机组能耗 8 MW, 能耗系数为 0.27 MW·h/t, 捕集率最大值、最小值分别为 0.9, 0.4; 存储二氧化碳单价为 35 元/t, 碳交易单价为 93 元/t; 溶剂成本系数为 8 元/kg, 运行损耗系数为 2 kg/t; 电量转换成热量的折算系数为 6 MJ/(MW·h)。

4.2 优化调度结果

本文提出的基于改进灰狼优化算法的多区域虚拟电厂协调优化调度模型是以虚拟电厂售电收益、碳交易收益最高, 弃风光成本、失负荷成本、碳捕集成本、新能源发电成本、环保成本、锅炉运维以及折旧成本最低为目标的优化函数, 使用的改进灰狼优化算法的个体为 24 h 的热电联产机组出力、光伏电站出力、风电机组出力、弃风和弃光功率以及锅炉和碳捕集设备能耗。每个区域虚拟电厂以经济效益最高为适应度函数, 满足功率约束, 对模型进行求解, 得到每个区域最优的热电联产机组出力、光伏电站出力、风电机组出力、弃风和弃光功率以及锅炉和碳捕集装置能耗, 实现多区域虚拟电厂的灵活优化调度。

各区域之间联合传输功率结果如图 9 所示。从图 9 中可知, 区域 3 因为负荷功率较小, 区域 1 和区域 2 不向其传输功率。在 02:00-14:00, 区域 1 向区域 2 传输功率; 在 17:00-19:00, 区域 3 向区域 1 传输功率; 在 07:00-10:00, 11:00-13:00, 区域 2 向区域 1 传输功率; 在 14:00-16:00, 区域 3 向区域 2 传输功率, 实现虚拟电厂不同区域之间互联调度。

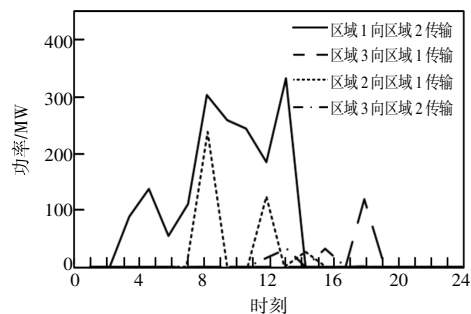


图 9 不同区域虚拟电厂传输功率

Fig.9 Virtual power plant transmission power in different regions

为了验证本文方法的有效性, 将本文所提的改进灰狼优化算法和未改进灰狼算法、粒子群优化算法进行对比, 各个区域虚拟电厂收益和碳排

放量结果如图 10,11 所示。从图 10,11 可以看出,与未改进灰狼算法、粒子群优化算法相比,采用本文所提方法时,区域 1 虚拟电厂收益分别提升了 24 万元和 43 万元,区域 2 虚拟电厂收益分别提升了 9 万元和 12 万元,区域 3 虚拟电厂收益分别提升了 2 万元和 13 万元。采用本文所提方法时,二氧化碳排放量最低,说明本文所提方法环保效益最优。这是因为本文所提方法通过收敛因子衰减和变异策略对灰狼算法进行改进,提高了搜索能力,进而提升了多区域虚拟电厂协调优化调度模型求解精度。与粒子群优化算法相比,灰狼算法搜索效率高、收敛速度快,在虚拟电厂调度模型求解中效果更好。

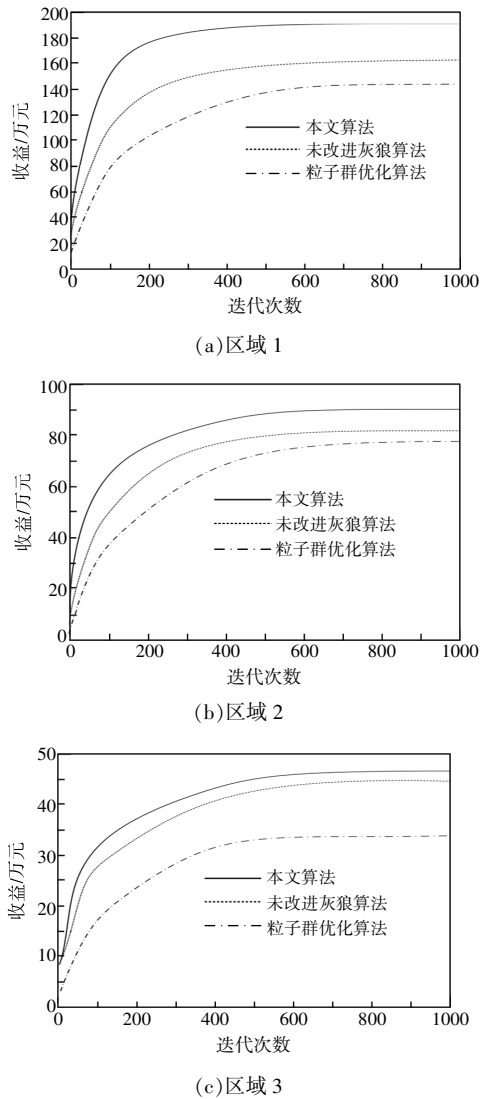


图 10 不同区域虚拟电厂收益
Fig.10 Revenue from virtual power plants in different regions

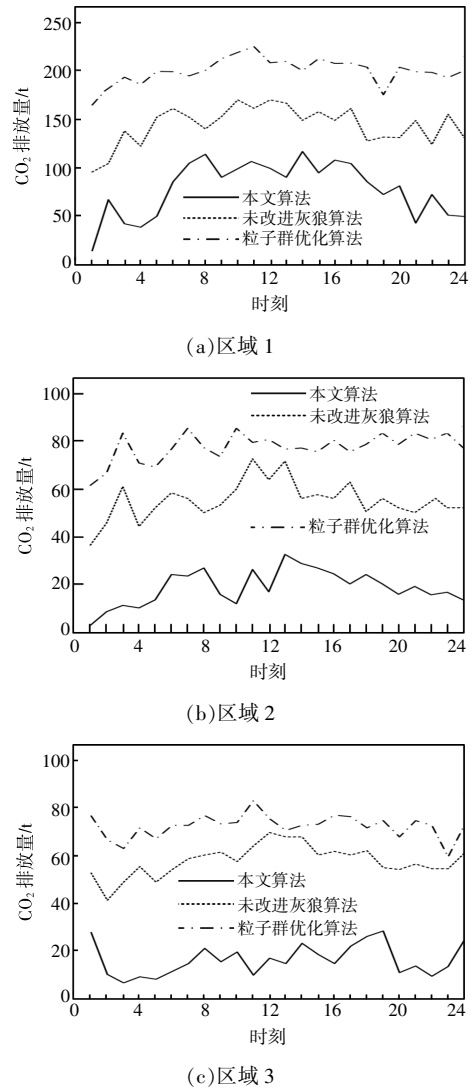


图 11 不同区域虚拟电厂碳排放量
Fig.11 Carbon emissions from virtual power plants in different regions

5 结论

本文提出了一种基于改进灰狼优化算法的多区域虚拟电厂协调优化调度技术,主要取得了以下研究成果。

①构建经济效益最优的运行优化模型,将不同区域虚拟电厂分布式新能源互联,联合调度风、光发电机组与碳捕集机组。

②利用灰狼优化算法搜索效率高、收敛速度快、优化参数少的优点,对模型进行寻优求解,与此同时,提出了一种改进灰狼优化算法,提高了算法的全局寻优能力,解决了算法后期容易出现早熟以及局部最优的问题。

③通过仿真分析,验证了本文所提方法能够

实现不同区域虚拟电厂优化调度,降低了虚拟电厂的碳排放量和净成本。

参考文献:

- [1] 李翔宇,赵冬梅.分散架构下多虚拟电厂分布式协同优化调度[J].电工技术学报,2023,38(7):1852-1863.
- [2] 郑冉,夏彦辉,赵学茂,等.基于云-边-端协同控制的综合型虚拟电厂[J].电气技术,2023,24(9):40-48.
- [3] 王红野,何俐,王雪峰,等.风电与电动汽车组成虚拟电厂参与市场的多主体博弈[J].可再生能源,2020,38(12):1686-1692.
- [4] 陈海鹏,周越豪,赵畅,等.考虑高载能负荷参与的多时间尺度风电消纳调度[J].东北电力大学学报,2022,42(6):39-51.
- [5] 詹智民,范玉宏,刘翔枫,等.含可再生能源的虚拟电厂参与碳市场交易优化模型[J].可再生能源,2023,41(9):1263-1269.
- [6] 王秀云,刘国钦,梁晓龙,等.基于改进虚拟同步发电机的预同步并网控制研究[J].东北电力大学学报,2023,43(1):92-98.
- [7] 彭元,娄素华,吴耀武,等.考虑储液式碳捕集电厂的含风电系统低碳经济调度[J].电工技术学报,2021,36(21):4508-4516.
- [8] 陈芳,王泽,尉鹏程.碳交易背景下含P2G-碳捕集的综合能源系统机会模糊优化调度方法研究[J].电气应用,2023,42(10):62-69.
- [9] 范松丽,艾芊,贺兴.基于机会约束规划的虚拟电厂调度风险分析[J].中国电机工程学报,2015,35(16):4025-4034.
- [10] 秦子恺,黄婧杰,周任军,等.计及源-荷不确定性的虚拟电厂多目标鲁棒优化调度[J].电力系统及其自动化学报,2023,35(6):13-21.
- [11] 谭忠富,谭彩霞,蒲雷,等.基于协同免疫量子粒子群优化算法的虚拟电厂双层博弈模型[J].电力建设,2020,41(6):9-17.
- [12] 孙惠娟,蒙锦辉,彭春华.风-光-水-碳捕集多区域虚拟电厂协调优化调度[J].电网技术,2019,43(11):4040-4051.
- [13] 陈继开,侯文字,李浩茹,等.一种基于虚拟惯量控制的非故障雷击多端柔直低频振荡平抑方法[J].东北电力大学学报,2023,43(4):10-19.
- [14] 孙乐平,郭小璇,李景顺,等.基于MGWO-SD模型的户用光伏装机容量预测研究[J].可再生能源,2023,41(12):1579-1586.

Coordinated optimization scheduling technology for multiregion virtual power plants based on improved Grey Wolf Optimization Algorithm

Dai Guanquan¹, Pan Kaiyan², Cai Ying¹, Lin Guobiao², Zeng Shunqi¹, Huang Yuxiang³, Liu Xiaojie²
(1.Guangzhou Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co.,Ltd., Guangzhou 518000, China; 2.D ongfang Electronics Co.,Ltd., Yantai 264000, China; 3.South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: To promote the realization of the "dual carbon" goal, the distributed new energy in different regions of the virtual power plant is coordinated and optimized through low-carbon power generation. A multi region virtual power plant coordinated and optimized scheduling technology based on the Grey Wolf Optimization Algorithm is proposed. Firstly, construct an operational optimization model with the best economic benefits, connecting virtual power plants in different regions with distributed new energy, and jointly scheduling wind and solar power generation units and carbon capture units; Secondly, due to the difficulty in solving, strong nonlinearity, and high dimensionality of the constructed model, the advantages of the Grey Wolf Optimization Algorithm such as high search efficiency, fast convergence speed, and few optimization parameters are utilized to optimize the model. At the same time, an improved Grey Wolf Optimization Algorithm is proposed to improve the algorithm's global optimization ability and solve the problem of premature and local optima in the later stage of the algorithm; Finally, through simulation verification, the proposed method can achieve optimal scheduling of virtual power plants in different regions, reducing carbon emissions and net costs.

Keywords: low carbon electricity; virtual power plant; distributed new energy; Grey Wolf Optimization Algorithm; optimize scheduling