

魏伊琳, 荣娜, 曹韵, 等. 基于 TCHBA 的梯级水风光储联合系统经济调度[J]. 智能计算机与应用, 2025, 15(1): 95-102.
DOI: 10.20169/j.issn.2095-2163.250115

基于 TCHBA 的梯级水风光储联合系统经济调度

魏伊琳¹, 荣娜¹, 曹韵¹, 罗勇²

(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毕节供电局 毕节, 550081)

摘要:为解决 HBA(Honey Badger Algorithm, HBA)求解电力系统复杂案例时易出现陷入局部最优、求解结果不稳定等问题,本文在原始算法基础上引入了 Tent 混沌映射和柯西变异扰动,提出了一种改进蜜獾算法(Tent map and Cauchy mutation based Honey Badger Algorithm, TCHBA)。TCHBA 在初始化种群时,借助 Tent 混沌映射策略提高种群多样性;在迭代更新阶段,加入柯西变异扰动,优化搜索方法以促进全局探索,避免困于局部最优解。将 TCHBA 进行基准函数测试,与 HBA、粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)、协方差矩阵自适应策略优化算法(Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy, CMA-ES)和鲸鱼优化算法(Whale Optimization Algorithm, WOA)4种不同的算法进行对比实验,实验结果验证了 TCHBA 算法的有效性和准确性。最后,在一个修改的 IEEE6 机 30 节点系统中展开算例分析,结果表明 TCHBA 算法在考虑梯级水风光储一体化出力的多能源耦合发电系统经济调度问题中有良好性能。

关键词: 梯级水风光储一体化; 经济调度; 改进蜜獾算法; 混沌映射; 柯西变异扰动

中图分类号: TM734

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2025)01-0095-08

Economic dispatch of a cascade hydro-wind-photovoltaic-storage complementary system based on TCHBA

WEI Yilin¹, RONG Na¹, CAO Yun¹, LUO Yong²

(1 College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2 Bijie Power Supply Bureau of Guizhou Power Grid Co., Ltd, Bijie 550081, Guizhou, China)

Abstract: To solve the problems that HBA (Honey Badger Algorithm, HBA) is easy to fall into local optimum and unstable solution results when solving complex cases of power systems, this paper introduces Tent chaos mapping and Cauchy variation perturbation for modification based on the original algorithm, and proposes an improved Honey Badger Algorithm (Tent map and Cauchy mutation based Honey Badger Algorithm, TCHBA). TCHBA is used to initialize the population with the help of the Tent chaos mapping strategy in order to improve the population diversity. Further, in the iterative update phase, a Cauchy variation perturbation is added so as to improve the global search capability and avoid getting trapped in a local optimum. TCHBA was tested as a benchmark function with the help of HBA, Particle Swarm Optimization (PSO), Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy (CMA-ES) and Whale Optimization Algorithm (WOA). The results validate the effectiveness and accuracy of the proposed algorithm TCHBA. Finally, a modified IEEE 6-machine 30-node system is used to analyze the algorithm. The results show that the TCHBA algorithm performs well in a multi-energy coupled power generation system economic dispatch that considers the integrated output of cascade hydro-wind-photovoltaic-storage(CHWPS).

Key words: CHWPS; economic dispatch; TCHBA; Tent map; Cauchy mutation

0 引言

近年来,为实现双碳目标,急需提高煤电机组的能效,并加大对光伏、风电、水电等新能源的开发力

度,以提高新能源在能源结构中的比例^[1]。因此,积极探索梯级水风光储一体化经济调度研究具有重要意义。

经济调度问题作为一种约束优化问题,在过去

基金项目: 贵州省科技支撑计划项目([2023]329); 贵州省科技支撑计划项目([2023]290)。

作者简介: 魏伊琳(1999—),女,硕士研究生,主要研究方向:电力系统与综合能源。

通信作者: 荣娜(1979—),女,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向:电力系统与综合能源。Email: rrong@gzu.edu.cn。

收稿日期: 2023-09-06

的研究中经常采用 λ -迭代法、拉格朗日松弛法、梯度投影法进行求解^[2]。而实际的电力系统较为复杂,使得优化问题的搜索空间呈指数型增长,可行域区间内存在多个峰值,传统数学方法在求解此类问题时往往容易陷入局部最优,无法获得全局最优解^[3-4]。在各种实际工程的优化问题中,借助元启发式优化算法求解成为一种趋势。文献[5]为解决动态调度问题,提出了一种基于自适应差分进化和实数编码改进的遗传算法,同时采用约束处理机制、等式约束的动态松弛机制和发散机制来提高算法性能;文献[6]在解决含风光新能源电力系统经济调度问题时,提出了一种改进遗传算法,通过定义新遗传算子和变异操作,防止产生不可行解。通过对蜜獾觅食行为的研究,文献[7]于2022年提出了一种名为蜜獾算法(Honey Badger Algorithm, HBA)的新型元启发式算法。HBA在求解复杂搜索空间的优化问题时能提供良好的求解能力,在收敛速度方面具有优势。然而,目前尚未有研究将HBA应用到电力系统算例中。除此之外,HBA仍存在一些问题,如易陷入局部最优、求解结果不稳定等。

为提升清洁能源消纳和外送能力,减少潮流迂回,降低网损,增加电网运行灵活性,进一步地充分发挥贵州省能源优势,本文构建了一个考虑梯级水风光储一体化发电的多能源耦合系统双层经济调度模型。为提高HBA全局搜索能力和求解稳定性,本文引入了Tent混沌映射和柯西变异扰动,提出了一种改进蜜獾算法(Tent map and Cauchy variation based Honey Badger Algorithm, TCHBA)。在4个基准测试函数和修改后的IEEE 6机30节点系统上分别进行了验证,结果表明所提出的算法具有较高的准确性与快速收敛性。

1 考虑梯级水风光储一体化出力的双层调度模型

为有效促进新能源消纳,减少弃风弃光损失,本文建立考虑梯级水风光储一体化出力的双层优化调度模型,模型结构如图1所示。

上层模型以系统净负荷方差最小为目标,以梯级水电机组运行约束、风光出力约束等为约束条件,得到各能源机组出力情况和净负荷曲线。

下层模型以系统综合成本最小为目标,在满足火电机组系统运行和潮流约束等条件的前提下,对火电机组出力进行优化,以实现系统综合成本的最小化。



图1 双层优化调度模型结构

Fig. 1 Structure of two-layer optimal scheduling model

1.1 上层优化调度模型

1.1.1 目标函数

上层优化模型的目标函数为系统净负荷方差最小,表达式如下:

$$\min F_1 = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (P_{\text{net},t} - P_{\text{net,ave}})^2 \quad (1)$$

其中, F_1 表示系统电网净负荷方差; $P_{\text{net},t}$ 表示 t 时段系统电网的净负荷; $P_{\text{net,ave}}$ 表示系统在整个调度周期内净负荷的平均值。

净负荷及其平均值的计算公式:

$$\begin{cases} P_{\text{net},t} = P_{d,t} - (1 - \lambda_{pv,t})P_{pv,t} + \eta_c P_{sc,t} - \eta_d P_{sd,t} \\ P_{\text{net,ave}} = (\sum_{t=1}^T P_{\text{net},t}) / T \end{cases} \quad (2)$$

其中, $P_{d,t}$ 表示系统在 t 时段的初始负荷; $\lambda_{pv,t}$ 表示 t 时段的弃光率,取值在0~1之间; $P_{pv,t}$ 表示光伏电站在 t 时段的输出功率; η_c 表示储能机组的充电效率; $P_{sc,t}$ 表示储能机组在 t 时段充电功率; η_d 表示储能机组的放电效率; $P_{sd,t}$ 表示储能机组在 t 时段的放电功率。

1.1.2 约束条件

为充分利用能源,减少弃能,本文提出梯级水风光蓄一体出力发电模型,其中包含梯级水电机组、风电机组、光伏机组、抽蓄机组,模型示意图如图2。

上层优化模型求解时的约束条件包含以下方面:

1) 水电机组出力约束

梯级水电机组应满足出力约束、流量约束、水库容量约束,如下式^[8]:

$$\begin{cases} Ph_{i,\min} \leq Ph_{i,t} \leq Ph_{i,\max} \\ Qh_{i,\min} \leq Qh_{i,t} \leq Qh_{i,\max} \\ Vh_{i,\min} \leq Vh_{i,t} \leq Vh_{i,\max} \end{cases} \quad (3)$$

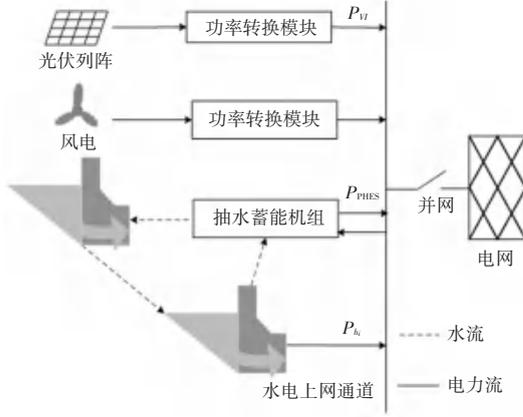


图 2 水风光储一体发电模型

Fig. 2 Hydro-Photovoltaic-Pumped power generation model

梯级水电站容量应由下式决定:

$$Vh_{i,\max} = Vh_{i,t-1} + (Ih_{i,t} - Qh_{i,t} + Qh_{i-1,t}) \quad (4)$$

其中: $Ph_{i,t}$ 为水电站 i 在 t 时段的出力值; $Qh_{i,t}$ 为水电站 i 在 t 时段的流量; $Vh_{i,t}$ 为水电站 i 在 t 时段的水库容量; $Ih_{i,t}$ 为水电站 i 在 t 时段的自然流入水量。

2) 风电、光伏机组出力约束

风电、光伏机组出力应满足上下限约束, 上限为预测的风电、光伏机组出力, 下限为 0, 如下式所示, $P_{w,t}$ 、 $P_{p,t}$ 分别为风电、光伏机组在 t 时段的出力; $P_{w,t,pre}$ 、 $P_{p,t,pre}$ 分别为预测的风电、光伏机组出力。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{w,t} \leq P_{w,t,pre} \\ 0 \leq P_{p,t} \leq P_{p,t,pre} \end{cases} \quad (5)$$

3) 抽水蓄能机组出力约束

抽水蓄能机组应满足发电模式功率约束、抽水模式功率约束与水位约束, 公式如下:

$$\begin{cases} Ph_{g,\min} \leq Ph_{g,t} \leq Ph_{g,\max} \\ P_{hp,\min} \leq P_{hp,t} \leq P_{hp,\max} \\ E_{h,\min} \leq E_{h,t} \leq E_{h,\max} \end{cases} \quad (6)$$

其中: $P_{hg,t}$ 表示抽蓄机组在 t 时段的发电功率; $P_{hp,t}$ 表示抽蓄机组在 t 时段的抽水功率; $E_{h,t}$ 表示抽蓄机组在 t 时段的上水库水位。

抽水蓄能机组水位可由下式计算得出:

$$E_{h,t+1} = E_{h,t} + (\eta_p P_{hp,t} - \eta_g P_{hg,t}) \quad (7)$$

其中, η_p 、 η_g 表示抽水与发电转换系数。

4) 弃风弃光率约束

本文模型加入了弃风弃光率约束, 如下式:

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^T \lambda_{pv,t} P_{pv,t} / \sum_{t=1}^T P_{pv,t} \leq k_{pv,\max} \\ \sum_{t=1}^T \lambda_{w,t} P_{pw,t} / \sum_{t=1}^T P_{pw,t} \leq k_{pw,\max} \end{cases} \quad (8)$$

其中, $\lambda_{pv,t}$ 与 $\lambda_{w,t}$ 分别代表弃风率与弃光率。

5) 电池储能机组运行约束

电池储能机组约束应满足容量约束与充放电功率约束, 公式如下:

$$W_{B,\min} \leq W_{i,B} \leq W_{B,\max} \quad (9)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{sc,t} \leq P_{c,\max} \\ 0 \leq P_{sd,t} \leq P_{d,\max} \end{cases} \quad (10)$$

其中: $W_{B,\min}$ 、 $W_{B,\max}$ 分别表示储能机组可容纳电量上下限; $P_{c,\max}$ 、 $P_{d,\max}$ 分别表示储能机组在 t 时段最大充放电功率; $P_{c,t}$ 、 $P_{d,t}$ 为储能机组在 t 时段充放电功率。

1.2 下层优化调度模型

1.2.1 目标函数

本文进行经济调度优化研究时选取的下层模型优化目标函数为整个系统综合成本最小, 公式如下:

$$\min F = \sum_{t=1}^T (\sum_{i=1}^{N_G} f_G + f_S + f_E + f_C) \quad (11)$$

其中: F 表示整个系统的综合成本; f_G 表示火电机组运行成本; N_G 表示火电机组数目; f_S 表示储能机组的运行成本; f_E 表示碳交易成本; f_C 表示弃风弃光成本; T 表示调度周期, 取 24 h。

1) 火电机组运行成本

火电机组运行成本:

$$f_G = a_i P_{i,t}^2 + b_i P_{i,t} + c_i \quad (12)$$

其中, a_i 、 b_i 、 c_i 表示第 i 个火电机组的耗量系数, $P_{i,t}$ 表示第 i 个火电机组在 t 时段的有功出力值。

2) 电池储能机组运行成本

电池储能机组运行成本:

$$f_S = \frac{1}{P_{sn} T_a} C_{cap} \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} | (P_{sd,t} - P_{sc,t}) | \quad (13)$$

其中, P_{sn} 表示电化学储能机组装机容量; T_a 表示该机组年运行小时数; C_{cap} 表示其投资成本; r 表示折旧率; n 表示使用寿命; $P_{sc,t}$ 、 $P_{sd,t}$ 表示该机组在 t 时段内充放电的功率。

3) 碳交易成本

碳交易成本与总碳排放量与碳排放额度有关, 如下式所示:

$$f_E = \sigma (E_P - E_q) \quad (14)$$

其中, σ 表示单位碳排放价格; E_p 表示总碳排放量; E_q 表示系统碳排放额度。

总碳排放量与碳排放额度定义:

$$\begin{cases} E_p = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T M_{it} P_{it} \\ E_q = \varepsilon \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \eta P_{i,t} \end{cases} \quad (15)$$

其中, h 表示单位电量排放基准。

4) 弃风弃光成本

弃风弃光成本:

$$f_C = C_{cur} \cdot [(P_{w,t,pre} - P_{w,t}) + (P_{p,t,pre} - P_{p,t})] \quad (16)$$

其中, C_{cur} 表示弃风弃光成本系数; $P_{w,t,pre}$ 表示 t 时段内风电机组预测出力; $P_{p,t,pre}$ 表示 t 时段内光伏机组预测出力; $P_{w,t}$ 表示风电机组在 t 时段内实际出力; $P_{p,t}$ 表示光伏机组在 t 时段内的实际出力。

1.2.2 约束条件

1) 功率平衡约束

本模型需满足功率平衡约束,公式如下:

$$\sum_{i=1}^N P_{i,t} + P_{CHWP,t} - P_{sc,t} + P_{sd,t} = \sum_{d=1}^{N_L} P_{d,t} \quad (17)$$

其中: $P_{i,t}$ 为火电机组 i 在 t 时段内的出力; N 为火电机组台数; $P_{CHWPS,t}$ 为梯级水电及风光在 t 时刻出力; $P_{sc,t}$ 为储能机组在 t 时段充电功率; $P_{sd,t}$ 为储能机组在 t 时段放电功率; $P_{d,t}$ 为节点 d 在 t 时段的典型日负荷; N_L 为负荷节点数。

2) 火电机组运行约束

火电机组运行约束公式如下, $P_{i,t}$ 为火电机组 i 在 t 时段内的有功功率; $\delta_{i,t+}$ 、 $\delta_{i,t-}$ 分别为火电机组 i 在 t 时段增加、减少的爬坡容量。

$$\begin{cases} P_{i,\min} \leq P_{i,t} \leq P_{i,\max} \\ 0 \leq \delta_{i,t+} \leq \delta_{i,\max+} \\ 0 \leq \delta_{i,t-} \leq \delta_{i,\max-} \end{cases} \quad (18)$$

3) 线路容量约束

受端电网各线路的输电功率不应超过线路的最大输电容量,即 $0 < P_{L,t} < P_{L,\max}$, $P_{L,t}$ 为 t 时段线路的输电功率; $P_{L,\max}$ 为电路的最大输电容量。

2 求解方法

2.1 蜜獾算法(HBA算法)

受蜜獾觅食行为的启发,文献[7]提出了蜜獾算法。该算法将觅食的蜜獾分为两个种群,种群1中的蜜獾能够利用嗅觉来寻找猎物的位置;种群2中的蜜獾则可以在响蜜鸮的指引下直接定位蜂巢,从而获取食物。

HBA算法步骤如下:

1) 初始化种群。根据下式初始化蜜獾的数量及各自的位置:

$$x_i = lb_i + r_1 \times (ub_i - lb_i) \quad (19)$$

其中, lb_i 为可行域的下界; ub_i 为可行域的上界; r_1 为一个随机数。

2) 定义强度 I 。猎物的气味强度 I_i 与源强度 S 以及蜜獾到食物的距离 d_i 密切相关。 I_i 由反平方定律给出,并由公式(20)定义;源强度 S 由式(21)定义;蜜獾到食物的距离 d_i 由式(22)定义:

$$I_i = r_2 \times S / (4\pi d_i)^2 \quad (20)$$

$$S = (x_i - x_{i+1})^2 \quad (21)$$

$$d_i = x_{prey} - x_i \quad (22)$$

其中, r_2 为随机数; d_i 代表第 i 个蜜獾跟猎物的间距; x_{prey} 代表猎物的位置。

3) 更新密度因子 α 。为确保探索和开发之间的平稳过渡,用密度因子 α 控制随时间变化的随机化程度,利用下式更新密度因子 α :

$$\alpha = C \times \exp\left(\frac{-t}{t_{\max}}\right) \quad (23)$$

其中, C 为大于等于1的常数(默认值为2), t_{\max} 为最大迭代次数。

4) 逃离局部最优。蜜獾算法使用标志 F 来改变搜索方向,以便更好地搜索空间。

5) 更新位置,位置更新过程分为挖掘阶段和蜂蜜阶段两部分。

(1) 挖掘阶段。在此阶段,蜜獾执行类似于一个心形的动作,该心型运动可以通过以下方程式模拟:

$$x_{\text{new}} = x_{\text{prey}} + F \times \beta \times I \times x_{\text{prey}} + F \times r_3 \times \alpha \times d_i \times |\cos(2\pi r_4) \times [1 - \cos(2\pi r_5)]| \quad (24)$$

其中: x_{prey} 为猎物的位置; β 代表蜜獾觅食的能力; r_3 、 r_4 和 r_5 为3个不同的随机数,其数值介于0~1之间; F 为蜜獾觅食时变向的标志,公式如下:

$$F = \begin{cases} 1, & \text{if } r_6 \leq 0.5 \\ -1, & \text{else} \end{cases} \quad (25)$$

(2) 蜂蜜阶段。蜜獾由响蜜鸮引导到达蜂巢的情况可以模拟为下式:

$$x_{\text{new}} = x_{\text{prey}} + F \times r_7 \times \alpha \times d_i \quad (26)$$

其中, x_{new} 为蜜獾更新后的位置, x_{prey} 为蜂巢的位置。

从公式(26)可见,蜜獾在接近蜂巢位置 x_{prey} 的搜索受到距离信息 d_i 的影响,在这个阶段,搜索行为同样受到时间变化的影响。

2.2 基于 Tent 混沌和柯西变异扰动的蜜獾算法 (TCHBA 算法)

2.2.1 Tent 混沌初始化种群策略

混沌是一种普遍存在于自然界的非线性现象, 表现为复杂系统的动态行为难以预测和理解。混沌变量的随机性、遍历性和规律性使其具备多种作用和特性, 既可以表现出不可预测的随机行为, 也可以在广泛的值域内穿越, 同时呈现出复杂而有序的动态规律, 使得混沌变量在不同领域具有广泛的应用潜力, 当其应用于优化搜索领域时, 可保持种群的多样性, 增强算法全局搜索能力^[9]。Tent 映射产生的混沌映射具有良好的分布性和随机性, Tent 混沌序列分布如图 3 所示。

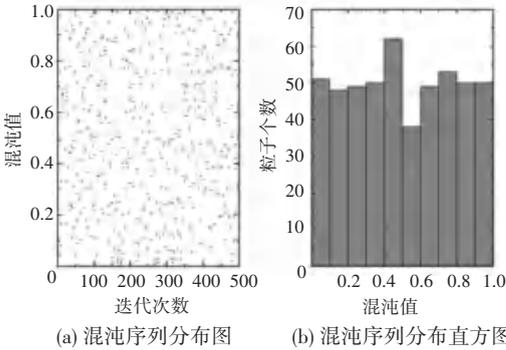


图 3 Tent 混沌序列分布

Fig. 3 Tent chaotic sequence distribution

Tent 映射表达式如下:

$$z_{t+1}^i = \begin{cases} 2z_t^i, & 0 \leq z_t^i \leq 0.5 \\ 2(1 - z_t^i), & 0.5 \leq z_t^i \leq 1 \end{cases} \quad (27)$$

其中, $i = 1, 2, \dots, N$, 表示种群规模; $t = 1, 2, \dots, d$, 表示空间维度。

之后将混沌序列通过下式逆映射回搜索空间, 从而形成初始化种群结果。

$$x_t^i = lb_i + z_t^i \times (ub_i - lb_i) \quad (28)$$

2.2.2 柯西变异扰动

柯西变异来源于连续型概率分布的柯西分布, 为展示柯西分布的扰动能力, 借助高斯分布进行对比, 高斯分布和柯西分布的概率密度函数曲线如图 4 所示。

从图 4 可看出, 柯西分布的特点是有较小的峰值, 从峰值到零值的下降速度缓慢, 具有长尾特性, 因此其扰动能力比高斯变异更强。柯西变异的特性使得个体在搜索过程中具有较大的跳跃性, 更有可能穿越搜索空间的局部极值, 从而增加了发现全局最优解的机会。通过在种群个体位置更新过程中引

入柯西变异, 旨在增强算法的搜索能力。该扰动的表达如下:

$$x_{i,k}^{t+1} = x_{i,k}^t + \text{Cauchy}(0, 1) x_{\text{best},k}^t \quad (29)$$

经过以上两种策略改进, 本文提出 TCHBA 算法运算流程图如图 5 所示。

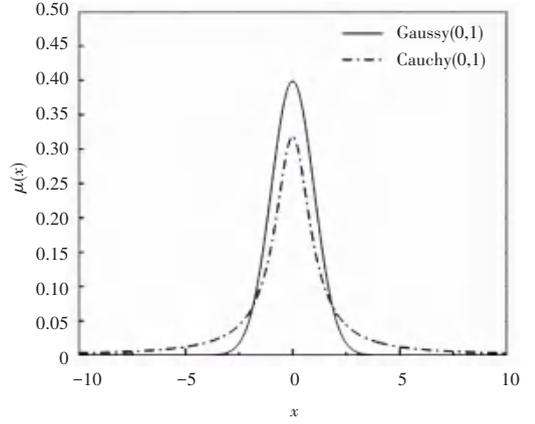


图 4 高斯分布和柯西分布的概率密度函数曲线

Fig. 4 Probability density function curves for Gaussian and Cauchy distributions

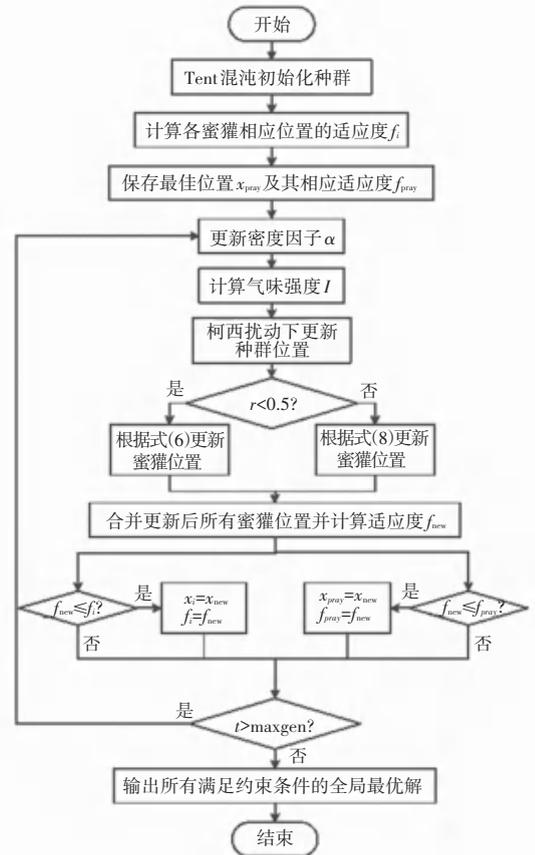


图 5 TCHBA 算法流程图

Fig. 5 Flow chart of TCHBA

2.3 基准函数测试

借助 4 个基准测试函数验证本文修改后算法即

TCHBA 的有效性,基准测试函数相关设置见表 1。同时通过 HBA、粒子群算法 (Particle Swarm Optimization, PSO)、协方差矩阵自适应策略优化算法 (Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy, CMA-ES) 和鲸鱼优化算法 (Whale Optimization Algorithm, WOA) 与本文提出修改后的算法进行对比,测试结果见表 2。

表 1 基准测试函数相关设置

Table 1 Test function settings

函数	编号	函数名称	维度	定义域	理论值
单峰函数	F1	Sphere Function	30	$[-100, 100]$	0
	F2	Schwefel 2.22	30	$[-10, 10]$	0
多峰函数	F3	Sum Squares	30	$[-10, 10]$	0
	F4	Brown	30	$[-1, 4]$	0

表 2 基准函数测试结果

Table 2 Benchmark function test results

函数	算法	最优值	最差值	标准差	平均值
F1	TCHBA	2.01E-351	2.60E-349	0.00E+00	5.30E-350
	HBA	1.30E-07	2.60E-05	0.00E+00	6.74E-302
	PSO	2.81E-30	8.60E-25	2.03E-27	3.71E-28
	CMA-ES	5.34E-24	4.45E-16	2.08E-18	2.94E-18
	WOA	3.65E-126	3.52E-120	1.24E-121	2.66E-122
F2	TCHBA	2.61E-167	1.81E-165	0.00E+00	1.17E-166
	HBA	2.20E-14	6.50E+10	1.50E-156	3.70E-156
	PSO	1.10E-05	2.70E-01	1.59E-02	7.5E-03
	CMA-ES	1.50E-12	3.30E-06	1.32E-08	8.53E-08
	WOA	4.52E-88	1.43E-77	5.63E-83	1.35E-83
F3	TCHBA	1.34E-351	4.38E-353	0.00E+00	1.07E-352
	HBA	2.10E-304	1.30E-291	0.00E+00	2.00E-300
	PSO	1.71E-46	3.61E-38	6.25E-41	3.61E-41
	CMA-ES	1.23E-68	1.90E-61	7.54E-65	1.65E-65
	WOA	1.32E-123	8.34E-118	6.14E-120	2.24E-120
F4	TCHBA	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	HBA	1.16E-302	8.54E-297	0.00E+00	1.96E-300
	PSO	4.34E-43	5.45E-39	6.25E-41	3.61E-41
	CMA-ES	1.46E-67	3.13E-63	7.54E-65	1.65E-65
	WOA	1.37E-123	3.98E-118	2.91E-120	1.68E-120

根据表 2 可以得出结论,在处理 F1 和 F2 两个单峰函数时,TCHBA 算法获得的最优值、最差值、标准差,平均值均优于其他 4 种算法,TCHBA 算法的寻优速度优于其他 4 种算法;对于 F3 和 F4 两个多峰函数,TCHBA 所得到的最优值、最差值均小于其他 4 种算法,表明 TCHBA 在全局寻优上更具优势。除此之外,TCHBA 运行 30 次所得结果的标准差和平均值均优于其他 4 种算法,体现出 TCHBA 算法求解复杂函数最优目标过程的稳定性。

3 算例

本文借助一个经修改的 IEEE-30 节点系统(如

图 6 所示)进行算例的仿真分析。该发电系统包括 6 台火机组、1 个梯级水风光储一体化出力电站。梯级水风光储一体化出力电站包含 3 个梯级小水电机组、1 个风电机组、1 个光伏机组以及一个储能机组,并网节点编号为 3,梯级水电机组参数见表 3。水风光规模按照雅砻江^[10]实际水风光一体化电站 1.00 : 0.34 : 0.40 比例进行建模;最大弃风弃光率分别取 9.8%、10%^[11-12]。本文负荷典型日选择负荷较大的夏至日,以 1 h 为一个调度时段。典型日的负荷、风电机组和光伏机组出力的曲线如图 7 所示。

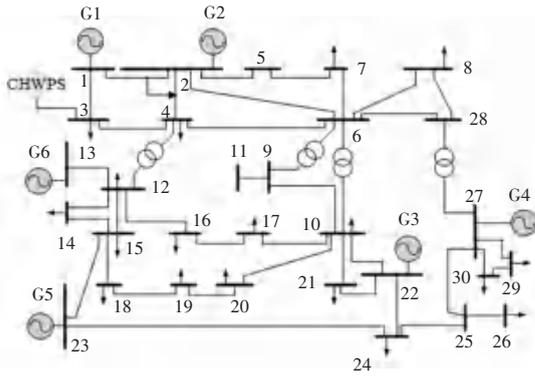


图 6 一个修改的 IEEE6 机 30 节点系统

Fig. 6 A modified IEEE 6-machine and 30-bus system

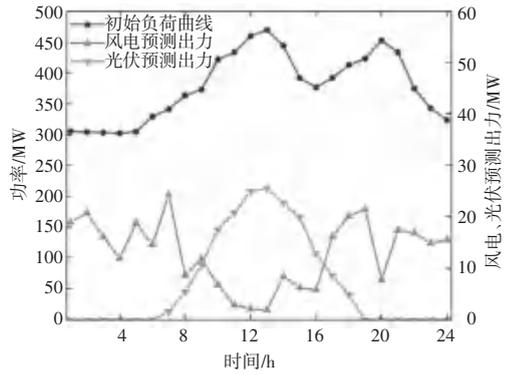


图 7 风电机组、光伏机组预测出力及典型日负荷曲线

Fig. 7 Wind power, photovoltaic forecast output and typical daily load curve

表 3 梯级水电机组参数

Table 3 Parameters of cascade hydroelectric plants

机组编号	综合出力系数	正常高水位/m	对应库容/ 10^8 m^3	死水位/m	对应库容/ 10^8 m^3
1	8.40	1 140	44.97	1 076	11.36
2	8.35	970	8.64	936	3.74
3	8.40	837	1.69	822	1.01

1) 不同场景下的结果分析

为探究梯级水风光储一体出力电站联合出力效益及不同类型储能机组对调度结果的影响,本文借助 TCHBA 对以下不同设置的场景进行求解。场景

1: 梯级水风光一体发电; 场景 2: 梯级水风光储一体发电; 场景 3: 梯级水光蓄一体发电, 各场景下优化调度结果见表 4。

表 4 各场景下优化调度结果

Table 4 Optimised scheduling results for each scenario

场景	综合成本/万元	碳排放量/t	碳交易成本/万元	弃风弃光量/(MW · h)
1	80.27	7 274.12	5.95	421.85
2	62.08	7 106.72	5.73	307.48
3	56.54	6 542.60	5.12	251.89

对比场景 1 和场景 2 可知, 当电池储能一起参与场景调度时, 综合成本下降了 5.54 万元, 碳排放量减少了 564.12 t, 碳交易成本降低了 0.61 万元, 弃风弃光量降低了 18.08%, 这是因为储能电站具有出色的适应性和可操控性, 不仅能够部分弥补风电和光伏电站产生的间歇性和波动性, 还可以降低火电机组的负荷, 并带来环境效益; 对比场景 2 和场景 3 可知, 梯级水风光蓄一体发电时, 抽水蓄能电站在负荷低谷时抽水储存电量, 在负荷高峰时作为电源补给, 实现了对弃风弃光电量的时空转移, 从而有效地降低负荷的峰谷差。同时, 抽水蓄能电站提供部分备用容量, 有助于缓解火电机组的调节压力, 综合成本下降了 18.19 万元, 碳排放量减少了 167.4 t, 弃风弃光量降低了 27.11%。场景对比结果表明, 梯级水电、风机发电、光伏发电和抽水蓄能

电站四者联合发电功率输出的互补性优于水风光互补功率输出的互补性。

2) 不同算法求解下的结果分析

借助 TCHBA、HBA、PSO、CMA-ES、WOA 分别对场景 3 中模型进行寻优运算。为避免算法求解时的随机性对运算结果造成干扰, 各算法运行 30 次, 运算结果见表 5。

表 5 不同算法求解结果

Table 5 Results of different algorithms

	最小值/ 10^5	最大值/ 10^5	均值/ 10^5	方差
TCHBA	5.538 5	5.802 3	5.722 0	0.060 3
HBA	5.575 7	6.113 0	5.760 5	0.116 7
PSO	5.668 9	6.144 0	5.828 1	0.258 2
CMA-ES	5.601 3	5.928 4	5.776 0	0.128 5
WOA	5.577 3	5.972 0	5.748 2	0.118 4

由表5可以得知,TCHBA算法独立运行30次的最小值、最大值、平均值在所有算法中均为最小,其最小目标值相较于HBA、PSO、CMA-ES和WOA算法分别降低了0.372万元、1.304万元、0.628万元和0.388万元;与此同时,其目标的最大值较另4种算法分别降低了3.398万元、3.107万元、1.261万元、1.697万元;除此之外,平均值相较于其他算法分别降低了0.385万元、1.061万元、0.540万元、0.262万元。综合对比结果说明TCHBA求解优化问题具备更高的性能,全局寻优的表现力更强。

TCHBA、HBA、PSO、CMA-ES、WOA 5种算法独立运行30次的最优收敛曲线如图8所示,进一步验证了所提算法搜索能力的优越性。由图8可知,在相同迭代次数下TCHBA具有更好的搜索值。由此可以看出,TCHBA算法的求解性能明显优于HBA、PSO、CMA-ES、WOA算法。

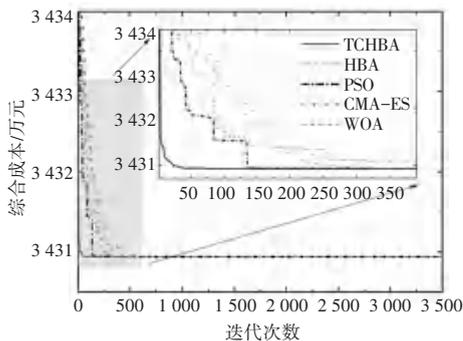


图8 5种算法收敛曲线

Fig. 8 Convergence curves for all algorithms

4 结束语

本文构建的梯级水风光储一体化调度模型能利用梯级水电站地理位置优势,为抽水蓄能电站提供便利,有效提升对风光的消纳能力,为能源结构转型

提供参考;在HBA算法的基础上提出了一种修改后的TCHBA算法,并通过基准函数测试验证了本文所提TCHBA算法的有效性和准确性。TCHBA算法相较HBA、PSO、CMA-ES、WOA 4种算法,在求解梯级水风光储一体化调度系统时,表现出更好的求解能力。

参考文献

- [1] 庞腊成,吉斌,徐帆,等. 面向电-碳市场协同的负荷响应机制与效益分析初探[J]. 电力系统自动化,2022,46(22):62-71.
- [2] 子伊,王玮,马伟,等. 梯级水光蓄互补发电系统实时协调控制策略[J]. 电网技术,2021,45(3):871-881.
- [3] 李铁,李正文,杨俊友,等. 计及调峰主动性的风光水火储多能系统互补协调优化调度[J]. 电网技术,2020,44(10):3622-3630.
- [4] 王开艳,罗先觉,吴玲,等. 清洁能源优先的风-水-火电力系统联合优化调度[J]. 中国电机工程学报,2013,33(13):27-35.
- [5] ZAMAN M F, ELSAYED S M, RAY T, et al. Sarker, Evolutionary algorithms for dynamic economic dispatch problems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2):1486-1495.
- [6] PONCIROLI R, STAUFF N E, RAMSEY J, et al. An improved genetic algorithm approach to the unit commitment/economic dispatch problem [J]. Trends in Ecology & Evolution, 2020, 35(5):4005-4013.
- [7] HASHIM F A, HOUSSEIN E H, HUSSAIN K, et al. Honey badger algorithm: New metaheuristic algorithm for solving optimization problems [J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2022,92:84-110.
- [8] 张智晟,樊秀娟,林涛. 基于量子蚁群优化算法的梯级水电系统经济调度[J]. 电力自动化设备,2010,30(10):17-21.
- [9] 王娟,秦江涛. 混沌映射与t-分布变异策略改进的海鸥优化算法[J]. 计算机应用研究,2022,39(1):170-176.
- [10] 曹韵,韩松,荣娜,等. 基于GCTMSA的梯级水火风光蓄联合调度[J]. 电力系统保护与控制,2023,51(3):108-116.
- [11] 叶泽,李湘旗,姜飞,等. 考虑最优弃能率的风光火储联合系统分层优化经济调度[J]. 电网技术,2021,45(6):10.
- [12] 国家发展改革委. 《清洁能源消纳行动计划(2018-2020年)》[EB/OL]. [2018-10-30]. <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/gxhwj/201812/W020190905495739358481.pdf>