

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.220475

基于 GCTMSA 的梯级水火风光蓄储联合调度

曹韵, 韩松, 荣娜, 詹献文, 刘敏

(贵州大学电气工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 为发展新型电力系统调度理论与方法, 构建了一个含梯级水风光蓄一体出力(the integration of cascade hydro-wind-photovoltaic-pumped storage, CHWPPS)的水火风光蓄储联合调度模型。同时, 针对传统求解方法在求解水火风光蓄储联合调度系统时易陷入局部最优、难以在满意时间内得出可行解等问题, 提出了一种基于贪婪策略、自适应交叉算子和自适应 t 分布变异的改进飞蛾搜索算法(greedy strategy, adaptive crossover operator and adaptive t-distribution variation based moth search algorithm, GCTMSA)。GCTMSA 将自适应交叉算子与 Lévy 飞行策略相结合, 在直线飞行策略中引入自适应 t 分布变异, 并利用贪婪策略仅接收更优个体, 以提高全局搜索能力和搜索速度。算例分析在一个修改的 IEEE 6 机 30 节点系统和一个省域简化电力系统中展开。结果表明, 与飞蛾搜索算法、遗传算法、粒子群算法和生物地理算法相比, GCTMSA 具有更强的搜索能力和稳定性。同时, 分析了 CHWPPS 和电池储能对系统的影响。相关讨论与结论可为水火风光蓄储联合调度等多能互补技术发展提供参考。

关键词: 梯级水风光蓄一体化; 自适应交叉算子; 自适应 t 分布; 贪婪策略; 改进飞蛾搜索算法

Dispatch of a cascade hydro-thermal-wind-photovoltaic-storage complementary system based on GCTMSA

CAO Yun, HAN Song, RONG Na, ZHAN Xianwen, LIU Min

(College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: To develop novel theories and methods of power system dispatch, this paper constructs a hydro-thermal-wind-photovoltaic-storage coupled dispatching system, one that integrates cascade hydro-wind-photovoltaic-pumped storage (CHWPPS). When analysing such a coupled dispatching system, it is easy for the traditional solution method to fall into a local optimum and it is challenging to arrive at a feasible solution within a satisfactory time. This paper proposes a greedy strategy, adaptive crossover operator and adaptive t-distribution variation-based moth search algorithm (GCTMSA) to overcome these shortcomings. GCTMSA combines the adaptive crossover operator with the Lévy flight strategy, introduces an adaptive t-distribution variation in flight straight strategy, and uses the greedy strategy to enhance the global search capability and speed. The case studies conducted on a modified IEEE 6-machine and 30-bus system and a provincial simplified power system show that the GCTMSA has more substantial search capability and stability than the traditional moth search, genetic or particle swarm algorithms, as well as biogeography-based optimization. The impact of CHWPPS and battery storage on the system is analyzed. The related discussion and conclusion can provide a reference for developing multi-energy complementary technologies such as dispatching hydro-thermal-wind-photovoltaic-storage coupled systems.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51967004).

Key words: CHWPPS; self-adaptive crossover operator; adaptive t-distribution; greedy strategy; GCTMSA

0 引言

多能互补技术是我国构建以新能源为主体的新

型电力系统的关键技术之一。它能充分利用不同能源的互补特性, 整合可再生能源和可控能源, 提升电网的灵活调度能力^[1-3]。

目前, 国内外学者已对不同类型的多能互补调度模型和方法等展开了大量研究。其一, 从多能互补类型的角度来看, 主要涉及了风-火^[4]、水-光^[5]、水-火-风-光^[6-7]、风-光-火-储^[8-9]等类型。其中, 文献[4]将易控火电与风电进行联合调度, 提升了风电在系统中的渗透率。文献[5]将清洁水电与光伏互

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51967004); 贵州省优秀青年科技人才项目资助(黔科合平台人才[2021]5645); 贵州省科学技术基金项目资助(黔科合基础[2021]277); 贵州省教育厅批准建设“新型电力系统及其数字化技术工程研究中心”(黔教技[2022]043号)

补接入系统,一定程度上平滑了光伏出力波动。文献[6-7]以火电、水电和可控负荷为可调度资源,构建了一个日前调度系统,实现调度经济性与鲁棒性的平衡。文献[8-9]引入储能装置,利用其灵活吞吐能力应对风光出力的不确定性,提升能源利用效率。然而,梯级水风光蓄一体化(the integration of cascade hydro-wind-photovoltaic-pumped storage, CHWPPS)及其与火电耦合等的多能互补研究还未见报道。因此,开展水火风光蓄储联合调度研究对于发展新型电力系统调度理论与方法具有重要意义。

其二,从多能互补调度模型和求解方法角度来看,各能源间的强耦合性和可再生能源的随机性,使多能互补调度问题的可行域空间变得十分复杂^[10-11]。拉格朗日松弛法^[12]和梯度投影法^[13]等传统求解方法效率低下,很难在满意时间内搜索到可行解。文献[14]构建了一个包含风光储在内的综合能源系统,在传统磷虾算法中引入线性递减策略,结合粒子群优化算法,有效提升模型求解效率。文献[15]建立了一种自适应增强的搜索性猎物机制来增强鲸群种群的多样性,防止算法陷入局部最优。文献[16]基于小波变异改进鲸鱼优化算法,与其他算法相比,改进的算法显著提高了系统经济性。文献[17]以最大源荷匹配度和最小弃电量为目标,构建了一个水光互补的源荷双层嵌套优化调度模型,采用改进的萤火虫算法进行求解,取得了显著的效果。从上述文献可以发现,采用元启发式算法求解多能互补系统优化调度问题是一条极具潜力的技术路线。近期提出的飞蛾搜索算法(moth search algorithm, MSA)^[18]是一种新型元启发式算法,相关领域的应用研究表明其具有较好的求解效率等优点^[19-21]。但暂未见 MSA 应用于新型电力系统调度领域的研究。

因此,为发展新型电力系统调度理论与方法,本文构建了一个含 CHWPPS 的水火风光蓄储联合经济调度模型。同时,为进一步提高 MSA 的搜索能力和稳定性,提出了一种基于贪婪策略、自适应交叉算子和自适应 t 分布变异的改进蛾群搜索算法(greedy strategy, adaptive crossover operator and adaptive t-distribution variation based moth search algorithm, GCTMSA)。一个修改的 IEEE 6 机 30 节点系统和一个省域简化电力系统的测试结果表明了本文所提模型和算法的有效性和优越性。

1 梯级水火风光蓄储低碳联合调度模型

1.1 目标函数

为考虑电力系统整体经济性,以综合成本最小为目标函数。

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

式中: F 为系统综合成本; f_G 、 f_S 分别为火电机组和电池储能机组的运行成本; f_E 为碳交易成本; f_C 为弃风弃光成本; T 为调度周期; N_G 为火电机组数。

1) 火电机组运行成本

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

式中: a_i 、 b_i 、 c_i 为火电机组 i 的耗量系数; $P_{i,t}$ 为火电机组 i 在 t 时段的有功出力。

2) 电池储能机组运行成本

$$f_S = \frac{1}{P_{sn} T_a} C_{cap} \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} |(P_{sd,t} - P_{sc,t})| \quad (3)$$

式中: P_{sn} 为电化学储能机组装机容量; T_a 为机组年运行小时数; C_{cap} 为投资成本; r 为折旧率; n 为使用寿命; $P_{sc,t}$ 、 $P_{sd,t}$ 分别为 t 时段内的充、放电功率。

3) 碳交易成本

$$f_E = \sigma(E_p - E_q) \quad (4)$$

$$\begin{cases} E_p = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T M_{i,t} P_{i,t} \\ E_q = \sum_{i=1}^T \sum_{t=1}^N \eta P_{i,t} \end{cases} \quad (5)$$

式中: σ 为单位碳交易价格; E_p 为总碳排放量; E_q 为系统碳排放额度; η 为单位电量排放基准; $M_{i,t}$ 为单位碳排放强度。

4) 弃风弃光成本

$$f_C = C_{cur} \cdot [(P_{w,t,pre} - P_{w,t}) + (P_{p,t,pre} - P_{p,t})] \quad (6)$$

式中: C_{cur} 为弃风弃光成本系数; $P_{w,t,pre}$ 、 $P_{p,t,pre}$ 分别为 t 时段内风电、光伏机组的预测出力; $P_{w,t}$ 、 $P_{p,t}$ 分别为 t 时段内风电、光伏机组的实际出力。

1.2 约束条件

1) 功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^N P_{i,t} + P_{CHWPPS,t} - P_{sc,t} + P_{sd,t} = \sum_{d=1}^{N_L} P_{d,t} \quad (7)$$

式中: $P_{d,t}$ 为 t 时段节点 d 的典型日负荷; N_L 为负荷节点数; $P_{CHWPPS,t}$ 为 CHWPPS 并网点处 t 时段内的出力。

$$P_{CHWPPS,t} = P_{w,t} + P_{p,t} + \sum_{i=1}^n P_{hi,t} + (P_{hg,t} - P_{hp,t}) \quad (8)$$

式中: $P_{hi,t}$ 为梯级小水电站 i 在 t 时段内的出力; $P_{hg,t}$ 、 $P_{hp,t}$ 分别为抽蓄电站 t 时段内的发电、抽水功率。

2) CHWPPS 运行约束

不考虑能量交换过程, CHWPPS 内部的电力流与水流情况如图 1 所示。

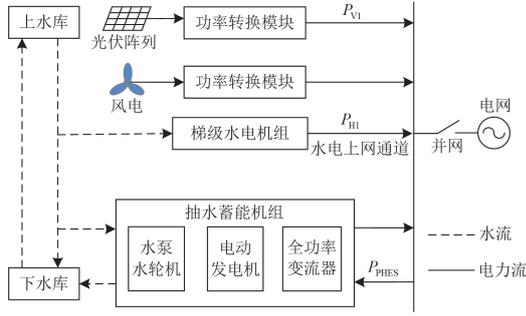


图 1 梯级水风光蓄一体发电系统

Fig. 1 CHWPPS

CHWPPS 出力约束为

$$P_{CHWPPS,t} \leq P_{CHWPPS,N} \quad (9)$$

式中, $P_{CHWPPS,N}$ 为梯级小水电机组总额定出力。

水电机组出力约束为

$$\begin{cases} P_{hi,min} \leq P_{hi,t} \leq P_{hi,max} \\ Q_{hi,min} \leq Q_{hi,t} \leq Q_{hi,max} \\ V_{hi,min} \leq V_{hi,t} \leq V_{hi,max} \end{cases} \quad (10)$$

$$V_{hi,t} = V_{hi,t-1} + (I_{hi,t} - Q_{hi,t} + Q_{hi-1,t}) \quad (11)$$

式中: $P_{hi,max}$ 、 $P_{hi,min}$ 为水电机组出力的上、下限; $Q_{hi,max}$ 、 $Q_{hi,min}$ 为水电站 i 的流量上、下限; $V_{hi,max}$ 、 $V_{hi,min}$ 为水电站 i 的水库容量上、下限; $I_{hi,t}$ 为 t 时段内水库 i 的自然流入量。

风电、光伏机组出力约束为

$$\begin{cases} 0 \leq P_{w,t} \leq P_{w,t,pre} \\ 0 \leq P_{p,t} \leq P_{p,t,pre} \end{cases} \quad (12)$$

抽水蓄能机组约束为

$$\begin{cases} P_{hg,min} \leq P_{hg,t} \leq P_{hg,max} \\ P_{hp,min} \leq P_{hp,t} \leq P_{hp,max} \\ E_{h,min} \leq E_{h,t} \leq E_{h,max} \end{cases} \quad (13)$$

$$E_{h,t+1} = E_{h,t} + (\eta_p P_{hp,t} - \eta_g P_{hg,t}) \quad (14)$$

式中: $P_{hg,max}$ 、 $P_{hg,min}$ 分别为抽蓄机组的发电上、下限; $P_{hp,max}$ 、 $P_{hp,min}$ 分别为抽蓄机组的抽水功率上、下限; $E_{h,t}$ 为 t 时段内上水库水位; $E_{h,max}$ 、 $E_{h,min}$ 分别为上水库水位上、下限; η_p 、 η_g 分别为抽水与发电水量转换系数。

3) 火电机组运行约束

$$P_{i,min} \leq P_{i,t} \leq P_{i,max} \quad (15)$$

$$\begin{cases} 0 \leq \delta_{i,t+} \leq \delta_{i,max+} \\ 0 \leq \delta_{i,t-} \leq \delta_{i,max-} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $P_{i,max}$ 、 $P_{i,min}$ 分别为 t 时段机组 i 有功功率的上、下限; $\delta_{i,t+}$ 、 $\delta_{i,t-}$ 分别为机组 i 在 t 时段增加、减少的爬坡容量; $\delta_{i,max+}$ 、 $\delta_{i,max-}$ 分别为机组 i 在 t 时段可增加、可减少的最大爬坡容量。

4) 电池储能机组运行约束

$$W_{B,min} \leq W_{i,B} \leq W_{B,max} \quad (17)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{sc,t} \leq P_{c,max} \\ 0 \leq P_{sd,t} \leq P_{d,max} \end{cases} \quad (18)$$

式中: $P_{c,max}$ 、 $P_{d,max}$ 分别为机组在 t 时段内的最大充、放电量; $W_{B,max}$ 、 $W_{B,min}$ 分别为机组可容纳电量上、下限。

5) 网络安全约束

本文借助直流潮流表述潮流分布, 引入功率转移分布因子(power transfer distribution factor, PTDF) 直接描述节点有功功率与线路有功潮流的线性关系, 使得电力调度优化模型无需考虑中间变量节点电压相角, 基于 PTDF 的直流潮流计算方法能够获得与交流潮流相近的结果^[22]。

$$P_{l,min} \leq \sum_{i=1}^{N_G} G_{l-i} P_{i,t} - \sum_{j=1}^{N_L} G_{l-j} P_{j,t} \leq P_{l,max} \quad (19)$$

式中: $P_{l,max}$ 、 $P_{l,min}$ 分别为线路 l 传输功率的上、下限; G_{l-i} 、 G_{l-j} 分别为节点 i 、 j 与线路 l 的功率转移分布因子。

2 求解方法

2.1 飞蛾搜索算法

受飞蛾趋光性和 Lévy 飞行特性的启发, 文献[18]提出了 MSA。该算法按适应度值大小将整个种群分为两个相等的子群, 适应度最好的飞蛾被视为光源, 子群 1 中飞蛾利用 Lévy 飞行策略, 依靠自身的位置信息扩大算法的搜索范围, 如式(20)所示。

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \frac{S_{max}}{t^2} L(s) \quad (20)$$

式中: x_i^{t+1} 与 x_i^t 为第 t 代的更新位置和原始位置; S_{max} 为最大步长; $L(s)$ 是从 Lévy 分布中提取的移动步长。

$$L(s) = \frac{(\beta-1)\Gamma(\beta-1)\sin(\pi(\beta-1)/2)}{\pi s^\beta} \quad (21)$$

式中: $s > 0$; $\Gamma(\cdot)$ 为伽玛函数, 设 β 为 1.5。

相反, 子群 2 中适应度较低的飞蛾以直线飞行策略向光源迈进, 更新公式如式(22)。

$$\begin{cases} x_i^{t+1} = \lambda(x_i^t + \phi(x_{best}^t - x_i^t)) & P_r \leq 0.5 \\ x_i^{t+1} = \lambda(x_i^t + \frac{1}{\phi}(x_{best}^t - x_i^t)) & \text{其他} \end{cases} \quad (22)$$

式中: x_{best}^t 为第 t 代最佳蛾类; ϕ 为加速因子; λ 为比例因子; P_r 为随机生成的均匀分布实数, $P_r \in [0,1]$ 。

2.2 改进的飞蛾搜索算法

传统 MSA 中直线飞行算子的隐性学习机制主要集中在全局最优个体上, 易陷入局部最优, 收敛速度慢。要进一步改进 MSA 性能, 需要深入研究维持种群多样性和共享优良信息的替代策略^[21]。

1) 改进的自适应交叉算子

为充分共享飞蛾间信息, 提升全局搜索能力及收敛速度, 本文提出了一种自适应交叉算子, 在 MSA 利用式(20)进行位置更新后, 根据个体适应值对位置进行优化, 使算法前期快速跳出局部最优, 并提高迭代后期种群的多样性。具体公式如式(23)。

$$x_j^{t+1} = x_i^t L + x_i^{t+1} (1 - L) \quad (23)$$

式中: x_j^{t+1} 表示 x_i^{t+1} 与 x_i^t 交叉产生的子代个体位置; L 为交叉率。 L 的大小随飞蛾个体和最优飞蛾自适应度值的变化而变化, 其表达式如式(24)。

$$L = 0.3 + 0.7 \frac{f(x_i^t) - f(x_{best}^t)}{f(x_{worst}^t) - f(x_{best}^t)} \quad (24)$$

式中: $f(x_i^t)$ 为飞蛾 i 的适应度; $f(x_{worst}^t)$ 为最差飞蛾适应度; $f(x_{best}^t)$ 为最优飞蛾适应度。

2) 自适应 t 分布变异

为进一步提升迭代后期种群多样性, 提高算法全局搜索能力, 本文在直线飞行策略中加入自适应 t 分布变异。

在智能优化算法中, 常用柯西变异算子与高斯变异算子来提升算法的求解性能, 柯西变异算子在全局搜索上有较强的能力, 且在迭代过程中可以保持种群的多样性; 而高斯变异算子在局部开发上有较强的搜索能力, 能在一定程度上提高收敛速度。自适应 t 分布变异综合两者优点, 将迭代次数 n 视为自由度参数, 其概率密度函数表达式如式(25)。

$$p(x) = \frac{\Gamma((n+1)/2)}{\sqrt{n\pi}\Gamma(n/2)} (1 + x^2/n)^{-(n+1)/2}, x \in (-\infty, \infty) \quad (25)$$

当 $n=1$ 时, t 分布可以变换为标准柯西分布, 而当 $n \rightarrow \infty$ 时, t 分布就逐渐转换为了标准的高斯分布, 标准柯西分布与高斯分布是 t 分布的两个边界特例分布。三者的分布函数如图 2 所示。

对飞蛾位置利用自适应 t 分布变异进行更新, 如式(26)。

$$x_j^{t+1} = x_i^{t+1} + x_i^{t+1} \cdot t(\text{iter}) \quad (26)$$

式中: x_j^{t+1} 是经过 t 分布变异后的个体位置; $t(\text{iter})$ 是以算法的迭代次数为自由度的 t 分布。

3) 贪婪策略

贪婪策略选择适应度更好的飞蛾个体更新。

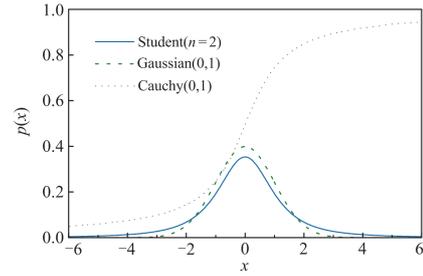


图 2 柯西分布、t 分布和高斯分布函数分布图

Fig. 2 Cauchy distribution, t-distribution and Gaussian distribution

$$x_{j,\text{new}}^{t+1} = \begin{cases} x_i^{t+1} & f(x_i^{t+1}) < f(x_j^{t+1}) \\ x_j^{t+1} & f(x_i^{t+1}) > f(x_j^{t+1}) \end{cases} \quad (27)$$

式中: $f(x_i^{t+1})$ 为未改进前第 t 代的更新后飞蛾 i 的适应度; $x_{j,\text{new}}^{t+1}$ 为第 $t+1$ 代新生成的飞蛾。

2.3 求解流程

综上, 本文所提改进算法的流程如图 3 所示。

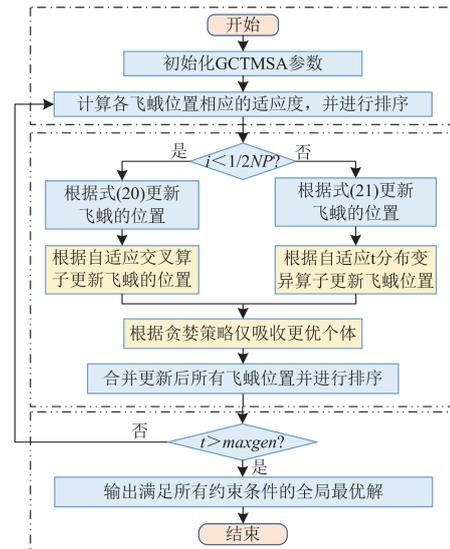


图 3 GCTMSA 流程图

Fig. 3 Flow chart of GCTMSA

Step1: 初始化 GCTMSA 参数。设置迭代次数 maxgen 、种群数量 NP 、最大移动步长 S_{max} 、指数 β 、加速因子 ϕ 和比例因子 λ 。

Step2: 计算飞蛾个体适应度值并排序。

Step3: 将整个种群按照排序大小分为两个相等的子群。子群 1 通过 Lévy 飞行策略、自适应交叉算子更新飞蛾位置, 子群 2 通过直线飞行算子、自适应 t 分布变异算子更新飞蛾位置, 并通过贪婪策略更新更优飞蛾个体位置, 合并新子群后进行排序。

Step4: 判断是否大于迭代次数, 若是, 则输出最优可行解, 否则返回 Step3。

3 算例分析

3.1 IEEE 6 机 30 节点系统仿真

为验证本文所提调度模型及方法的有效性及其优越性,本文借助 GCTMSA 对一个修改的 IEEE 6 机 30 节点系统进行优化。系统接线图如图 4 所示,节点 2 接入一个电池储能机组,额定容量为 233 MWh,其每小时最大充放电功率为±60 MW,充放电效率为 0.9。节点 3 接入了一个 CHWPPS,其中包含 3 个梯级小水电机组、1 个风电机组、1 个光伏机组及一个抽蓄机组,水风光规模比例根据雅砻江实际水风光一体电站 1:0.34:0.4 比例进行建模,抽蓄电站抽水与放电的功率为±30 MW,抽蓄电站参数^[23]见表 1,抽水和发电效率为 0.9。火电机组参数见文献[24],单位碳交易成本为 40 元/t,碳排放配额为 0.8 t/MW。弃风弃光惩罚系数为 200 元/MWh,风电、光伏预测功率及典型日负荷如图 5 所示。GCTMSA 的参数设置如下:每代保存飞蛾数量为 2,最大移动步长为 1,加速系数为 0.618。所有算法的种群规模为 100,迭代次数为 3000,其他算法详细参数设置见文献[25]。

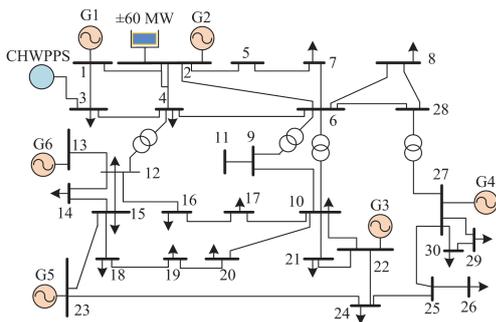


图 4 一个修改的 IEEE6 机 30 节点系统

Fig. 4 A modified IEEE 6-machine and 30-bus system

表 1 抽水蓄能机组相关参数

Table 1 Related parameters of pumped storage unit

初始 库容/m ³	最小 库容/m ³	最大 库容/m ³	$\eta_p / (\text{m}^3/\text{MWh})$	$\eta_g / (\text{m}^3/\text{MWh})$
378 200	378 200	666 370	74.9	99.8

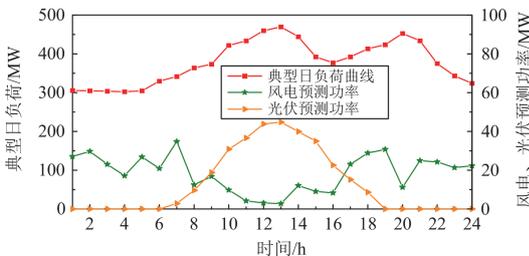


图 5 风电、光伏预测功率及典型日负荷

Fig. 5 Forecast power of wind power, PV power, and typical daily load

1) 不同场景下的结果分析

为验证 CHPPWS 电站联合出力效益及抽蓄、电池储能机组对调度结果的影响,本文借助 GCTMSA 对 3 种场景进行求解,场景 1:风、光、水、火参与调度,不考虑电池储能和抽蓄,考虑梯级水风光一体发电;场景 2:风、光、水、火、抽蓄参与调度,不考虑电化学储能,考虑梯级水风光蓄一体发电;场景 3:风、光、水、火、抽蓄、电化学储能参与调度,考虑梯级水风光蓄一体发电。各场景下优化调度结果如表 2 所示,图 6 为各场景下日前优化调度结果。

表 2 各场景下结果参数对比 I

Table 2 Parameters comparison I under different scenarios

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	通道利用率/%
1	73.02	6836.22	5.53	433.92	66.98
2	59.65	6707.61	5.48	360.53	71.42
3	56.54	6542.60	5.12	251.89	74.41

综合观察表 2 与图 6 可知,3 种场景下各能源出力总和均满足功率平衡约束。对比场景 1、2 可知,当梯级水、风、光、蓄一体接入电网时,抽蓄电站利用自身灵活吞吐的能力,在低峰负荷时,就地消纳了多余的水风光出力,在高峰负荷时输出储存电力,提升了 CHWPPS 总出力的同时减少了火电机组出力。此时,综合成本下降了 13.39 万元,碳排放量降低了 128.61 t,弃风弃光量下降 16.91%,通道利用率也由 66.98%提升至 71.42%。而随着场景 3 中电池储能机组的接入,系统的灵活调度能力得到了提升,储能在系统中占比达到了 40%。电池储能机组为系统提供了大量的备用容量,并且可以快速安排自身调度空间贴合负荷需求,有效缓解了火电机组的调峰压力及其爬坡幅度,进一步减少火电机组出力,为 CHWPPS 出力创造空间,有效提高了系统低碳经济性。对比场景 2、3,碳交易成本下降了 0.36 万元,弃风弃光量减少了 99 MW,现有水电通道利用率由 71.42%提升至 74.41%。虽然电池储能的接入大大提升了电网的灵活性,但电池储能机组的使用将会造成一定的损耗成本,综合成本仅小幅下降 3.11 万元。

通过以上对系统运行经济性与环保性的分析结果可以得出,在系统中考虑 CHWPPS 能够有效提升可再生能源就地消纳能力,增加通道利用率,提高经济效益。同时,当系统中储能总装机容量增加时,可以在一定程度上缓解火电机组调峰压力,提高可再生能源渗透率,实现低碳经济调度。并且,3 种场景下 GCTMSA 均能获得可行解,这说明本文所提算法的普适性。

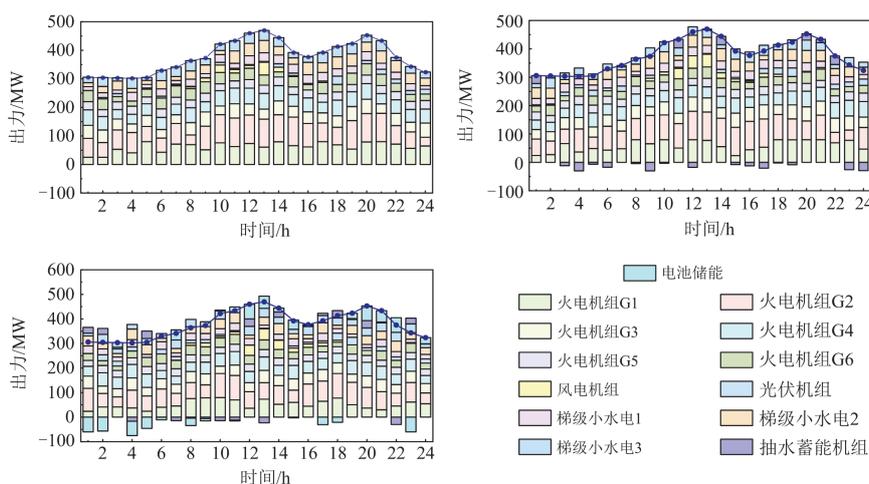


图6 各场景下日前优化调度

Fig. 6 Day-ahead optimal dispatch under different scenarios

2) 不同算法下的求解结果分析

借助 GCTMSA、粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)、遗传算法(genetic algorithm, GA)和生物地理算法(biogeography-based optimization, BBO)分别对场景3下含CHWPPS的梯级水火风光蓄储联合调度模型进行求解寻优, 为避免算法求解的随机性, 每种算法均独立运行30次, 统计所得最小值、最大值、均值及方差结果如表3所示。并将各算法独立运行30次求解结果的最大值、最小值和平均值作为评价算法搜索能力的指标, 方差作为判别算法求解稳定性的指标。

表3 不同算法的统计结果

Table 3 Statistical results for different algorithms

算法	最小值 ($\times 10^5$)	最大值 ($\times 10^5$)	平均值 ($\times 10^5$)	方差
GCTMSA	5.5453	5.8113	5.6932	0.0618
MSA	5.5760	5.9428	5.7756	0.1137
GA	5.6593	6.6633	6.1109	0.2687
PSO	5.6104	6.1310	5.8250	0.1181
BBO	5.5759	5.9717	5.7415	0.1033

从表3中可以确认, GCTMSA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MSA、GA、PSO和BBO算法分别降低了0.307万元、1.14万元、0.651万元和0.306万元, 最大值分别降低了1.316万元、8.586万元、3.197万元和1.604万元, 平均值分别降低了0.824万元、4.177万元、1.318万元和0.483万元。此结果综合说明了GCTMSA在种群多样性上明显优于其他算法, 且能搜索到更小的综合成本, 具有较强的寻优能力。

并且, 在所有算法求解结果中, GCTMSA的最大值和最小值差值最小, 为2.66万元, 且其能取得最低的方差。GCTMSA独立运行30次求解结果的方差相较于MSA、GA、PSO和BBO算法分别降低了45.6%、77.0%、47.7%和40.2%, 表明了GCTMSA求解结果的稳定性。此外, 为了直观地观察各算法求解结果的分布情况, 借助图7所示的箱线图将各算法独立运行30次求解所得综合成本值可视化。由图7可知, 相较于其他优化算法, GCTMSA所对应的箱体最扁、端线最短, 中位数值和均值也是所有算法中最小的, 说明GCTMSA独立运行30次所获得的综合成本值分布最为集中, 波动最小, 具有更优越的稳定性。

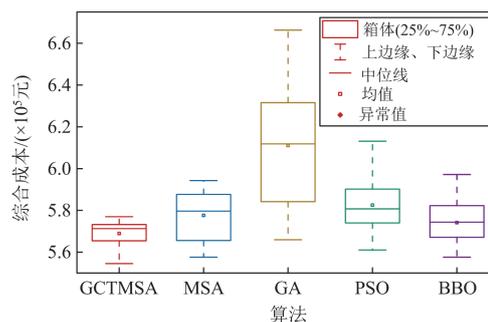


图7 运行30次的综合成本值分布1

Fig. 7 Distribution of comprehensive cost for 30 runs of simulation I

与此同时, 图8展示了所有算法独立运行30次的收敛曲线。由图8可以看出, GCTMSA相较于其他算法, 下降速度更快, 当迭代次数相同时, GCTMSA具有更低的目标适应值, 收敛更为迅速, GCTMSA在不到200次迭代次数内收敛并取得更

低的全局目标函数值，而 MSA、GA、PSO 和 BBO 算法均出现陷入局部最优的情况，其收敛迭代次数均大于 200 次。此结果进一步验证了所提算法寻优速度的优越性。

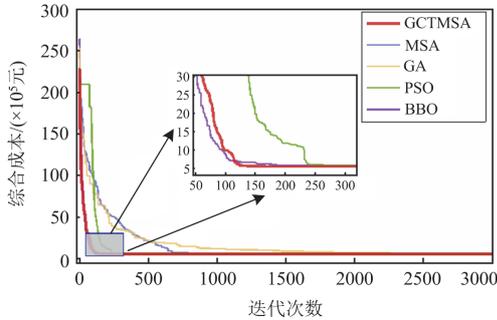


图 8 所有算法的收敛曲线 1

Fig. 8 Convergence curves I for all algorithms

3.2 省域简化电力系统仿真

为了进一步验证本文所提方法与模型在实际系统中的有效性和优越性，在中国某省简化电网系统上展开算例分析，系统接线图如图 9 所示。其中包括 9 台火力发电机组，总装机容量为 10 730 MW。在节点 11 接入一台装机容量为 900 MW 的电池储能机组，其充放电功率为±250 MW，充放电效率为 0.9。分别在节点 3 和节点 10 接入 3 个 CHWPPS 电站，包含 HJD、DF、SFY 3 台水电站组成的梯级水电站群及其周边 3 台风电机组、3 台光伏机组、3 台抽蓄机组，梯级水电站总装机容量为 1895 MW，每台抽水蓄能电站抽水功率和放电功率均为 253 MW。光伏数据收集自文献[7]中节点 4 处平均出力，典型日负荷及光伏出力曲线如图 10 所示，风速数据见文献[7]，弃风弃光惩罚系数为 500 元/MWh，其他参数设置与 IEEE 6 机 30 节点中设置相同。

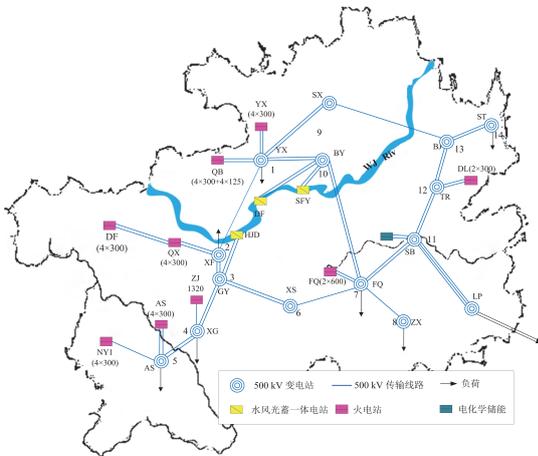


图 9 一个简化的省域电网系统

Fig. 9 A simplified provincial grid system

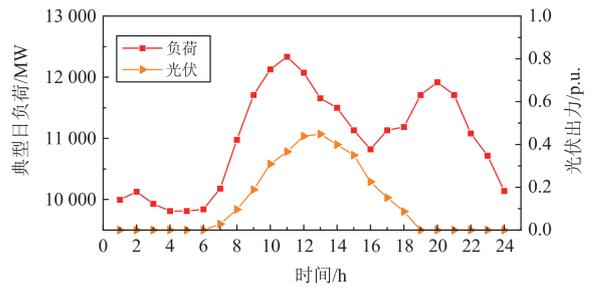


图 10 典型日负荷及光伏出力曲线 2

Fig. 10 Typical daily load and PV output curve II

1) 不同场景下的结果分析

借助 GCTMSA 仿真所得不同场景下的优化结果如表 4 所示。场景设置与 IEEE 6 机 30 节点系统相同。

表 4 各场景下结果参数比对 2

Table 4 Parameters comparison II under different scenarios

场景	综合成本/万元	碳排量/t	碳交易成本/万元	弃风、弃光量/MW	通道总利用率/%
1	11 564.85	232403.27	189.39	2413.83	71.02
2	8264.77	231091.89	188.77	2174.79	74.21
3	8108.07	230105.01	188.36	2049.39	76.03

由表 4 可知，本文场景 3 下各优化结果均优于其他两种场景。尤其是在综合总成本方面，场景 2 比场景 1 降低了 28.5%。通道容量从 71.02%提升到了 74.21%，弃风弃光量降低了 239.04 MW，这再次验证了 CHWPPS 对提升系统能源利用率与经济效益的有效性。其次，对比场景 2 和场景 3 下实验结果可以发现，在系统中接入具有灵活调节能力的储能机组，能迅速反应负荷需求，弃风弃光量从场景 2 的 2174.79 MW 减少到了 2049.39 MW，通道利用率提升了 2.45%。由于储能自身存在损耗，综合成本小幅度减少了 156.70 万元，碳排放量从 2 231 091.89 t 减少到了 230 105.01 t。进一步为系统低碳经济运行创造条件。

2) 不同算法下的求解结果分析

将 GCTMSA 与传统 MSA、GA、PSO 和 BBO 算法分别独立运行 30 次的求解结果进行比较，统计结果如表 5 所示。

表 5 不同算法的统计结果 2

Table 5 Statistical results II for different algorithms

算法	最小值 ($\times 10^7$)	最大值 ($\times 10^7$)	平均值 ($\times 10^7$)	方差
GCTMSA	8.0528	8.2928	8.1666	0.0605
MSA	8.1673	8.4343	8.3012	0.0891
GA	8.2116	23.7027	9.9524	2.9468
PSO	8.1024	32.5025	10.4719	5.1585
BBO	8.0622	8.3274	8.1631	0.0670

由表 5 可知,在 30 次独立运行中,GCTMSA 在最小值、最大值、平均值方面均优于其他算法。GCTMSA 搜索获得了综合成本最小值,为 8052.8 万元,其次综合成本最小值由 BBO 获得,为 8062.2 万元,GCTMSA 比 BBO 求解所得综合成本最小值结果降低了 9.4 万元。值得注意的是,在实际系统中,由于机组数量较多,GA 和 PSO 算法求解存在较大的随机性,存在无法求出最优值的情况,最大值分别为 23 702 万元和 32 502 万元,而 GCTMSA 相对稳定,目标函数最大值和最小值差值仅为 240 万元。并且,图 11 展示了将 GCTMSA、MSA、GA、PSO、BBO 分别独立运行 30 次求解结果的分布情况。

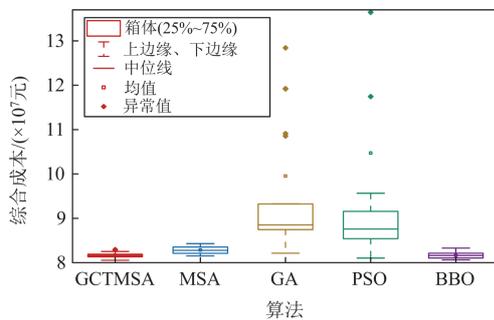


图 11 运行 30 次的综合成本值分布 2

Fig. 11 Distribution of comprehensive cost for 30 runs of simulation II

综合图 11 中各算法分别独立运行 30 次求解结果的分布情况和表 5 的方差值可知,相较于 MSA、GA、PSO、BBO,GCTMSA 对应的箱体最扁,上下边缘间隔最近,中位数值和均值均是所有算法中最小的,且其方差相较于其他算法,最大减少了 5.098。进一步验证了本文所提算法 GCTMSA 求解的稳定性。值得一提的是,GCTMSA 在收敛特性方面相较于其他算法也表现优越。观察图 12 可知,GCTMSA 在迭代初期下降明显,且在迭代次数相同时,能取得更低的目标值。

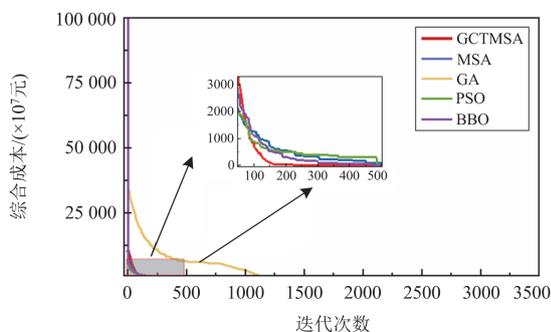


图 12 所有算法的收敛曲线 2

Fig. 12 Convergence curves II for all algorithms

4 结论

针对新型电力系统中多能互补调度问题,本文从模型与求解方法两方面开展了研究,构建了一个含 CHWPPS 的梯级水风光蓄储联合调度模型,并提出了一种基于贪婪策略、自适应交叉算子和自适应 t 分布的 GCTMSA 算法。在一个修改的 IEEE 6 机 30 节点系统和一个省域简化电力系统中开展了仿真实验,一些讨论和结论如下:

1) 本文构建的含 CHWPPS 的梯级水火风光蓄储联合调度模型,能充分挖掘抽蓄和储能的灵活能力,有效提升新能源消纳能力,提高现有水电通道利用效率,为多能互补调度技术发展提供参考。

2) 本文所提 GCTMSA 算法相较于 MSA、GA、PSO 和 BBO 算法,在两个系统中搜索所得综合成本最大分别减少了 1.14 万元和 158.88 万元,方差分别降低了 0.2069 和 5.098。这表明了 GCTMSA 求解含 CHWPPS 的梯级水风光蓄储联合调度系统时,能搜索到更为低碳经济的调度策略,稳定性更好,求解速度更快。

参考文献

- [1] JURASZ J, CANALES F A, KIES A, et al. A review on the complementarity of renewable energy sources: concept, metrics, application and future research directions[J]. *Solar Energy*, 2020, 195: 703-724.
- [2] 黎博, 陈民铀, 钟海旺, 等. 高比例可再生能源新型电力系统长期规划综述[J/OL]. *中国电机工程学报*: 1-27[2022-04-03]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.212716>.
- [3] LI Bo, CHEN Minyou, ZHONG Haiwang, et al. A review of long-term planning of new power systems with large share of renewable energy[J/OL]. *Proceedings of the CSEE*: 1-27[2022-04-03]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.212716>.
- [4] 冯奕, 应展烽, 颜建虎. 考虑碳排放成本的多能互补微能源网储能装置优化运行[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(8): 92-99.
- [5] FENG Yi, YING Zhanfeng, YAN Jianhu. Optimized operation of energy storage in a multi-energy complementary micro-energy network considering carbon emission cost[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(8): 92-99.
- [6] BERAHMANDPOUR H, KOUHSARI S M, RASTEGAR H. A new flexibility based probabilistic economic load dispatch solution incorporating wind power[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2022, 135.
- [7] TANG Y, FANG G, TAN Q, et al. Optimizing the sizes of wind and photovoltaic power plants integrated into a

- hydropower station based on power output complementarity[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 206.
- [6] YANG H, LIANG R, YUAN Y, et al. Distributionally robust optimal dispatch in the power system with high penetration of wind power based on net load fluctuation data[J]. *Applied Energy*, 2022, 313.
- [7] HUANG Q, HAN S, RONG N, et al. Stochastic economic dispatch of hydro-thermal-wind-photovoltaic power system considering mixed coal-blending combustion[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 218542-218553.
- [8] 臧紫坤, 杨晓辉, 李昭辉, 等. 考虑储热改造与最优弃能的风光火储低碳经济调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(12): 33-43.
- ZANG Zikun, YANG Xiaohui, LI Zhaohui, et al. Low-carbon economic scheduling of solar thermal storage considering heat storage transformation and optimal energy abandonment[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(12): 33-43.
- [9] BASU M. Multi-region dynamic economic dispatch of solar-wind-hydro-thermal power system incorporating pumped hydro energy storage[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2019, 86: 182-196.
- [10] 臧海祥, 马铭欣, 周亦洲, 等. 电力市场环境风电-光热-生物质混合电站鲁棒优化调度模型[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(5): 1-11.
- ZANG Haixiang, MA Mingxin, ZHOU Yizhou, et al. Robust optimal scheduling model for a 'wind power-concentrating solar power-biomass' hybrid power plant in the electricity market[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(5): 1-11.
- [11] SAKTHIVEL V P, SATHYA P D. Single and multi-area multi-fuel economic dispatch using a fuzzified squirrel search algorithm[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2021, 6(1): 1-13.
- [12] HINDI K S, AB GHANI M R. Dynamic economic dispatch for large scale power systems: a Lagrangian relaxation approach[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 1991, 13(1): 51-56.
- [13] GRANELLI G P, MARANNINO P. Fast and efficient gradient projection algorithm for dynamic generation dispatching[J]. *IEE Proceedings. Part C*, 1989, 136(5): 295-302.
- [14] DENG Z, YANG J, DONG C, et al. Research on economic dispatch of integrated energy system based on improved krill swarm algorithm[J]. *Energy Reports*, 2022, 8: 77-86.
- [15] YANG W, PENG Z, YANG Z, et al. An enhanced exploratory whale optimization algorithm for dynamic economic dispatch[J]. *Energy Reports*, 2021, 7: 7015-7029.
- [16] NADERI E, AZIZIVAHED A, ASRARI A. A step toward cleaner energy production: a water saving-based optimization approach for economic dispatch in modern power systems[J]. *Electric Power Systems Research*, 2022, 204.
- [17] 张歆蒨, 陈仕军, 曾宏, 等. 基于源荷匹配的异质能源互补发电调度[J]. *电网技术*, 2020, 44(9): 3314-3320.
- ZHANG Xinshuo, CHEN Shijun, ZENG Hong, et al. Heterogeneous energy complementary power generation dispatching based on output-load matching[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(9): 3314-3320.
- [18] WANG G G. Moth search algorithm: a bio-inspired metaheuristic algorithm for global optimization problems[J]. *Memetic Computing*, 2018, 10(2): 151-164.
- [19] FATHY A, ABD ELAZIZ M, SAYED E T, et al. Optimal parameter identification of triple-junction photovoltaic panel based on enhanced moth search algorithm[J]. *Energy*, 2019, 188.
- [20] SUN S, SU Y, YIN C, et al. Optimal parameters estimation of PEMFCs model using converged moth search algorithm[J]. *Energy Reports*, 2020, 6: 1501-1509.
- [21] FENG Y, WANG G G. A binary moth search algorithm based on self-learning for multidimensional knapsack problems[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2022, 126: 48-64.
- [22] 殷自力, 陈宇星. 基于功率传输转移分布因子的简化电网潮流计算方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(17): 25-30.
- YIN Zili, CHEN Yuxing. A power flow computation method for reduction grid based on power transfer distribution factor[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(17): 25-30.
- [23] MENÉNDEZ J, FERNÁNDEZ-ORO J M, GALDO M, et al. Efficiency analysis of underground pumped storage hydropower plants[J]. *Journal of Energy Storage*, 2020, 28.
- [24] 刘芸, 韩松, 黄秋立. 考虑火电深度调峰煤耗特性的随机机组组合[J]. *计算机仿真*, 2021, 38(2): 67-71, 86.
- LIU Yun, HAN Song, HUANG Qiuli. Stochastic unit commitment considering coal consumption of thermal units under deep peak regulation[J]. *Computer Simulation*, 2021, 38(2): 67-71, 86.
- [25] WANG G G, GUO L, GANDOMI A H, et al. Chaotic krill herd algorithm[J]. *Information Sciences*, 2014, 274: 17-34.

收稿日期: 2022-04-05; 修回日期: 2022-07-10

作者简介:

曹 韵(1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统与综合能源; E-mail: 1726454513@qq.com

韩 松(1978—), 男, 通信作者, 博士, 硕士生导师, 研究方向为交直流电力系统动态分析、新型电力电子装备以及配电网规划。E-mail: shan@gzu.edu.cn

(编辑 魏小丽)