

考虑阶梯型碳交易的梯级水火风光储联合调度

田珺玲¹, 荣娜¹, 张裕², 张建英¹, 刘兴艳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电网规划研究中心, 贵阳 550002)

摘要: 针对“双碳”减排目标以及新能源大规模并网带来的电力系统调峰问题, 提出了一种考虑阶梯型碳交易的梯级水火风光储多能联合优化调度模型。首先, 采用分层优化调度, 在上层模型中以负荷波动最小为目标函数, 使用一种考虑了 Circle 映射策略、三角形游走策略、Levy 飞行游走策略以及精英反向学习策略的改进沙丘猫群优化算法(modified sand cat swarm optimization, MSCSO)优化梯级水电的出力, 从而得到经过平滑后的等效负荷曲线。在下层模型中以综合成本最小为目标函数对其分段线性化进行求解。最后, 在修改的 IEEE 30 节点中进行多场景仿真计算, 结果表明所提模型可以有效减少碳排放量, 充分发挥火电机组的深度调峰能力, 有效提升新能源的消纳能力和系统运行的低碳性以及经济性, 验证了模型的有效性。

关键词: 阶梯型碳交易; 改进沙丘猫群算法; 梯级水火风光储; 深度调峰; 分层优化调度

Joint Scheduling of Cascade Hydro-Thermal-Wind-Photovoltaic-Storage Considering Stepped Carbon Trading

TIAN Junling¹, RONG Na¹, ZHANG Yu², ZHANG Jianying¹, LIU Xingyan²

(1. Department of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Power Grid Planning and Research Center, Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550002, China)

Abstract: Aiming at the "Dual-Carbon" emission reduction target and the peak shaving problem of power system brought by the large-scale grid connection of new energy sources, a cascade hydro-thermal-wind-photovoltaic-storage multi-energy joint optimal scheduling model considering the stepped carbon trading is proposed. Firstly, hierarchical optimal scheduling is adopted, and the minimum load fluctuation is taken as the objective function in the upper model, using a modified sand cat swarm optimization(MSCSO) algorithm that considers Circle mapping strategy, triangular migration strategy, Levy flight migration strategy and elite reverse learning strategy to optimize the output of cascade hydropower. Thus, the equivalent load curve after smoothing is obtained. In the lower model, the minimum comprehensive cost is taken as the objective function to solve its piecewise linearization. Finally, a multi-scenario simulation is carried out in the modified IEEE 30 nodes, and the results show that the proposed model can effectively reduce carbon emissions, give full play to the deep peak shaving capacity of thermal power units, effectively improve the new energy consumption capacity and the low-carbon and economic operation of the system, which verifies the validity of the model.

Key words: stepped carbon trading; MSCSO; cascade hydro-thermal-wind-photovoltaic-storage; deep peaking; hierarchical optimized scheduling

基金项目: 贵州省科技支撑计划项目([2023]290,[2023]329); 贵州省科学技术基金资助项目(黔科合基础-ZK[2021]一般277); 贵州省优秀青年科技人才项目(黔科合平台人才[2021]5645)。

Foundation item: Supported by the Science and Technology Support Program of Guizhou Province ([2023]290,[2023]329); the Science and Technology Foundation of Guizhou Province (Guizhou Science and Technology Foundation -ZK[2021] General 277); the Guizhou Province Outstanding Young Scientific and Technological Talents Project (Guizhou Science Cooperation Platform Talents [2021]5645).

0 引言

随着各国经济的快速发展以及能源需求量的持续增长,非可再生能源存量越来越少,且其开采对生态环境的影响日益严重^[1-2]。对风电、光伏等新能源大规模并网所带来的波动性和反调峰性,电力系统的调峰压力不断增大^[3]。为满足系统的调峰需求和提高可再生能源的消纳能力,研究多能互补技术具有重要意义。

碳交易可以分为传统和阶梯两种形式,是应对“碳达峰,碳中和”所提出的一种减碳机制。文献[4]在电-气-热-储系统中引入了阶梯式碳交易,减少了发电成本。文献[5]考虑电改气及其在碳交易市场中的激励作用,促进了综合能源系统运行的经济性和低碳性。文献[6]在微电网中引入了电-氢混合储能系统和阶梯式碳交易机制,有效减少了碳排放量。文献[7]考虑了双重需求响应和阶梯型碳交易机制,进一步提高了综合能源系统的经济性和环保性。文献[8]在风光储联合鲁棒优化调度模型中引入了阶梯型碳交易机制,有效减少了碳排放量,从而保证一定的环保性。文献[9]提出考虑电能市场、绿证市场和碳市场的模型,实验结果表明所提模型可以促进新能源消纳,间接减少碳排放量。目前,应用阶梯型碳交易的领域较多,但对于在高比例可再生的风光储系统中引入碳交易机制的研究还较少。

抽水蓄能电站与储能电站可以有效应对风、光等可再生能源的消纳问题,同时还可以改善负荷峰谷差^[10-13]。文献[14]建立的风-光-水-火-储双层调度模型有效提升了机组运行的经济性。文献[15]将混合式抽水蓄能加入风光互补系统中,提出了一种考虑长期和短期运行策略的多尺度嵌套联合运行模型,验证了混合抽水蓄能可以有效减少弃能。文献[16]考虑深度调峰的影响,提出了一种风-光-火-蓄多能源联合调度优化模型,证明了抽水蓄能可以有效改善风电和光伏并入电网的发调峰特性。文献[17]提出了一个含梯级水风光蓄一体出力的水-火-风-光-蓄-储联合调度优化模型,利用改进飞蛾搜索算法寻优,有效提高了新能源的消纳能力。文献[18]利用梯级水电的调节能力提出了一种梯级水-光互补的短期联合调度优化模型,提高了互补系统整体的消纳能力。目前,已有大量文献讨论了不同

类别的多能互补模型及其优化求解方法,但记载梯级水-风-光-储与火电耦合的多能调度优化模型的文獻还较少。

综上所述,为有效减少碳排放量、提高新能源消纳量、充分发挥梯级水电削峰填谷的能力和提升系统低碳性和经济性,本文提出一种考虑阶梯型碳交易的梯级水火风光储联合调度模型,并进行分层求解。其中,上层模型以负荷波动最小为目标函数,采用MSCSO进行优化求解,得到平抑后的等效负荷曲线;下层模型以综合成本最小为目标函数,采用CPLEX进行分段线性化计算。最后,在修改的IEEE30节点系统中进行多场景仿真,验证了该模型的有效性。

1 碳交易机制

目前,我国碳交易机制还处于初始阶段,国家相关部门会给每个生产商分配一定的免费碳排放额度,用超或者用剩的额度需要拿到碳交易市场上进行交易,利用这个机制在一定程度上减少生产商的碳排放量。

1.1 碳排放权配额

碳排放权配额方式的依据主要是装机容量和碳排放比重,据此进行分配免费配额^[19]。对于燃煤机组,其配额与机组的输出功率有关。

$$E_{\text{free}} = X_c \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T P_{\text{max},i,t} \quad (1)$$

式中: E_{free} 为碳排放权配额; X_c 为配额系数; $P_{\text{max},i,t}$ 为第 i 台燃煤机组在 t 时段内的最大输出功率; N 为燃煤机组数量; T 为调度周期。

1.2 阶梯型碳交易成本模型

传统碳交易成本模型由固定的基准价格与实际参与到碳交易市场的碳排放量之积所计算得出。阶梯型碳交易成本模型决定了递增的价格区间,若碳排放量越多,则生产商需要承受更多的资金压力,以此达到减排的目的。

$$E_a = X_a \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T P_{i,t} \quad (2)$$

式中: E_a 为实际碳排放量; X_a 为燃煤机组 CO_2 排放系数; $P_{i,t}$ 为第 i 台燃煤机组在 t 时段内的实际输出功率。

阶梯型碳交易成本模型如式(3)所示。其中,实际参与到碳交易市场的碳排放权交易额如式(4)

所示。

$$f_c = \begin{cases} \lambda E_c, 0 < E_c \leq l \\ \lambda l + \lambda(1+a)(E_c - l), l < E_c \leq 2l \\ \lambda(2+a)l + \lambda(1+2a)(E_c - 2l), 2l < E_c \leq 3l \\ \lambda(3+3a)l + \lambda(1+3a)(E_c - 3l), 3l < E_c \leq 4l \\ \lambda(4+6a)l + \lambda(1+4a)(E_c - 4l), E_c > 4l \end{cases} \quad (3)$$

$$E_c = E_a - E_{\text{free}} \quad (4)$$

式中: f_c 为阶梯型碳交易成本; λ 为基准价格; α 为增长系数; l 为阶梯区间。

2 考虑阶梯型碳交易的梯级水火风光储模型

2.1 上层优化调度模型

2.1.1 目标函数

净负荷指系统中扣除梯级水电出力后的剩余负荷量。为平抑负荷曲线, 上层模型以净负荷波动最小为目标函数。

$$\min f_1 = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T |P_{\text{nl},t} - P_{\text{nl,av}}| \quad (5)$$

$$P_{\text{nl},t} = P_{\text{load},t} - \sum_{h=1}^H P_{\text{hydro},h,t} \quad (6)$$

$$P_{\text{nl,av}} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T P_{\text{nl},t} \quad (7)$$

式中: f_1 为净负荷波动差; $P_{\text{nl},t}$ 为 t 时段的净负荷值; $P_{\text{nl,av}}$ 为一个调度期内净负荷的平均值; $P_{\text{load},t}$ 为 t 时段的原始负荷; $P_{\text{hydro},h,t}$ 为 t 时段水电 h 的实际并网功率; H 为水电站数量。

2.1.2 约束条件

水电机组出力约束如式(8)所示, 流量、库容以及水位边界约束如式(9)所示, 水力平衡约束如式(10)所示。

$$\begin{cases} P_{\text{hydro},h,t} = k \cdot Q_{\text{hydro},h,t} H_{\text{hydro},h,t} \\ H_{\text{hydro},h,t} = Z_{\text{hydro},h,\text{up},t} - Z_{\text{hydro},h,\text{down},t} \\ Z_{\text{hydro},h,\text{up},t} = \lambda_{h,1} V_{\text{hydro},h,t}^3 + \lambda_{h,2} V_{\text{hydro},h,t}^2 + \lambda_{h,3} V_{\text{hydro},h,t} + \lambda_{h,4} \\ Z_{\text{hydro},h,\text{down},t} = \mu_{h,1} Q_{\text{hydro},h,t}^3 + \mu_{h,2} Q_{\text{hydro},h,t}^2 + \mu_{h,3} Q_{\text{hydro},h,t} + \mu_{h,4} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} P_{\text{hydro},h,\min} \leq P_{\text{hydro},h,t} \leq P_{\text{hydro},h,\max} \\ Q_{\text{hydro},h,\min} \leq Q_{\text{hydro},h,t} \leq Q_{\text{hydro},h,\max} \\ Z_{\text{hydro},h,\min} \leq Z_{\text{hydro},h,t} \leq Z_{\text{hydro},h,\max} \\ V_{\text{hydro},h,\min} \leq V_{\text{hydro},h,t} \leq V_{\text{hydro},h,\max} \end{cases} \quad (9)$$

$$V_{\text{hydro},h,t} = V_{\text{hydro},h,t-1} + (I_{\text{hydro},h,t} - Q_{\text{hydro},h,t} + Q_{\text{hydro},h-1,t}) \quad (10)$$

式中: k 为水电出力系数; $Q_{\text{hydro},h,t}$ 为 t 时段水电 h 的流量; $H_{\text{hydro},h,t}$ 为 t 时段水电 h 的净水头; $Z_{\text{hydro},h,\text{up},t}$ 和 $Z_{\text{hydro},h,\text{down},t}$ 分别为 t 时段水电 h 的上水位与尾水位; $\lambda_{h,1}$ 、 $\lambda_{h,2}$ 、 $\lambda_{h,3}$ 和 $\lambda_{h,4}$ 为水电 h 库容与上水位之间的关系系数; $\mu_{h,1}$ 、 $\mu_{h,2}$ 、 $\mu_{h,3}$ 和 $\mu_{h,4}$ 为水电 h 发电流量与尾水位之间的关系系数; $V_{\text{hydro},h,t}$ 为 t 时段水电 h 的水库容量; $Z_{\text{hydro},h,t}$ 为 t 时段水电 h 的水库水位; $P_{\text{hydro},h,\max}$ 和 $P_{\text{hydro},h,\min}$ 分别为水电 h 出力的上、下限; $Q_{\text{hydro},h,\max}$ 和 $Q_{\text{hydro},h,\min}$ 分别为水电 h 流量的上、下限; $Z_{\text{hydro},h,\max}$ 和 $Z_{\text{hydro},h,\min}$ 分别为水电 h 水库水位的上、下限; $V_{\text{hydro},h,\max}$ 和 $V_{\text{hydro},h,\min}$ 分别为水电 h 水库容量的上、下限; $I_{\text{hydro},h,t}$ 为 t 时段水电 h 的自然来水量。

2.2 下层优化调度模型

2.2.1 目标函数

输入经上层模型优化后的净负荷曲线, 下层模型以综合成本最小为目标函数, 综合成本考虑以下三部分成本之和。

1) 火电机组运行成本 f_2

(1) 煤耗成本和启停成本 f_{cc}

$$f_{\text{cc}} = \sum_{i=1}^T \sum_{t=1}^I a_i P_{i,t}^2 + b_i P_{i,t} + c_i + \sum_{i=1}^T \sum_{t=1}^I S_{i,t} u_{i,t} (1 - u_{i,t-1}) \quad (11)$$

式中: a_i 、 b_i 、 c_i 为火电机组 i 的煤耗成本系数; $S_{i,t}$ 为火电机组 i 在 t 时段的启停成本; $u_{i,t}$ 为火电机组 i 在 t 时段的启停状态, 1 表示开机, 0 表示停机; I 为火电机组数量。

(2) 阶梯型碳交易成本 f_c

详见本文 1.2 节。

(3) 深度调峰机组损耗成本 $f_{i,i,t}$ 和投油成本 $f_{y,i,t}$ [20]

$$f_{i,i,t} = \frac{\beta C_{\text{unit},i}}{2N_f(P_{i,t})} \quad (12)$$

$$f_{y,i,t} = S_{\text{oil}} Q_{\text{oil},i,t} \quad (13)$$

式中: $f_{i,i,t}$ 和 $f_{y,i,t}$ 分别为火电机组 i 在 t 时段深度调峰的损耗成本和投油成本; β 为运行影响系数; $C_{\text{unit},i}$ 为火电机组 i 的购置成本; $N_f(P_{i,t})$ 为火电机组 i 在 t 时段中转子低周疲劳曲线确定的转子致裂循环周次; S_{oil} 为油价; $Q_{\text{oil},i,t}$ 为火电机组 i 在 t 时段投油稳燃时的油耗量。

综上, 火电机组运行成本可表示为:

$\min f_2 =$

$$\begin{cases} f_{cc} + f_c, P_{i,\min} < P_{i,t} \leq P_{i,\max} \\ f_{cc} + f_c + \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T f_{l,i,t}, P_a < P_{i,t} \leq P_{i,\min} \\ f_{cc} + f_c + \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T f_{l,i,t} + \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T f_{y,i,t}, P_b < P_{i,t} \leq P_a \end{cases} \quad (14)$$

式中: P_a 和 P_b 分别为不投油、投油阶段出力下限; $P_{i,\max}$ 和 $P_{i,\min}$ 分别为常规调峰阶段火电机组 i 的出力上、下限。

2) 弃风、弃光成本 f_3

$$\min f_3 = C_{\text{curt, wind}} \sum_{t=1}^T \sum_{w=1}^W (P_{\text{wind}, w, t, \text{pre}} - P_{\text{wind}, w, t}) + C_{\text{curt, PV}} \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M (P_{\text{PV}, m, t, \text{pre}} - P_{\text{PV}, m, t}) \quad (15)$$

式中: $C_{\text{curt, wind}}$ 和 $C_{\text{curt, PV}}$ 分别为弃风、弃光的成本惩罚系数; $P_{\text{wind}, w, t, \text{pre}}$ 和 $P_{\text{PV}, m, t, \text{pre}}$ 分别为 t 时段风电场 w 和光伏电站 m 的预测出力; $P_{\text{wind}, w, t}$ 和 $P_{\text{PV}, m, t}$ 分别为 t 时段风电 w 和光伏电站 m 的实际并网功率; W 为风电场数量; M 为光伏电站数量。

3) 储能成本 f_{sc}

$$f_{sc} = \sum_{t=1}^T c_{sc} (P_{\text{st}, d} + P_{\text{st}, c}) \quad (16)$$

式中: c_{sc} 为充放电功率成本系数; $P_{\text{st}, c}$ 和 $P_{\text{st}, d}$ 分别为充、放电功率。

2.2.2 约束条件

1) 功率平衡约束

$$P_{\text{load}, t} = \sum_{i=1}^I P_{i,t} + \sum_{w=1}^W P_{\text{wind}, w, t} + \sum_{m=1}^M P_{\text{PV}, m, t} + \sum_{h=1}^H P_{\text{hydro}, h, t} - P_{\text{st}, c} + P_{\text{st}, d} \quad (17)$$

2) 火电机组约束

$$\begin{cases} u_{i,t} P_{i,\min} < P_{i,t} \leq u_{i,t} P_{i,\max} \\ u_{i,t} P_b < P_{i,t} \leq u_{i,t} P_{i,\max} \\ -r_{i,\text{down}} \leq P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq r_{i,\text{up}} \end{cases} \quad (18)$$

式中 $r_{i,\text{up}}$ 和 $r_{i,\text{down}}$ 分别为火电机组 i 最大向上、向下爬坡速率。

3) 线路传输容量约束

本文借助直流潮流来表示网络安全约束^[21]。

$$P_{l,\min} \leq \sum_{p=1}^R G_{l-p} P_{p,t} - \sum_{q=1}^R G_{l-q} P_{q,t} \leq P_{l,\max} \quad (19)$$

式中: $P_{l,\min}$ 和 $P_{l,\max}$ 分别为线路 l 功率传输上、下限; G_{l-p} 和 G_{l-q} 分别为节点 p 、 q 对于线路 l 的转移分布因

子; $P_{p,t}$ 和 $P_{q,t}$ 分别为节点 p 、 q 在 t 时段的功率; R 为系统节点数量。

4) 风电、光伏机组出力约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{wind}, w, t} \leq P_{\text{wind}, w, t, \text{pre}} \\ 0 \leq P_{\text{PV}, m, t} \leq P_{\text{PV}, m, t, \text{pre}} \end{cases} \quad (20)$$

5) 储能系统能量与充放电约束^[22]

$$\begin{cases} S_{s,t} = S_{s,t-1} (1 - \delta) + \frac{P_{\text{st}, c} \eta_c \Delta t}{E_s} - \frac{P_{\text{st}, d} \Delta t}{\eta_d E_s} \\ S_{\min} \leq S_{s,t} \leq S_{\max} \end{cases} \quad (21)$$

式中: $S_{s,t}$ 为储能在 t 时段的荷电状态; η_c 和 η_d 分别为储能充、放电效率; Δt 为调度时间间隔; δ 为自放电率; E_s 为储能系统容量; $S_{\max}$ 和 $S_{\min}$ 分别为储能荷电状态上、下限。

$$\begin{cases} u_{t,c} P_{\text{smin}, c} \leq P_{\text{st}, c} \leq u_{t,c} P_{\text{smax}, c} \\ u_{t,d} P_{\text{smin}, d} \leq P_{\text{st}, d} \leq u_{t,d} P_{\text{smax}, d} \end{cases} \quad (22)$$

式中: $u_{t,c}$ 和 $u_{t,d}$ 分别为储能系统在 t 时段的充、放电状态系数; $P_{\text{smax}, c}$ 和 $P_{\text{smin}, c}$ 分别为储能充电功率上、下限; $P_{\text{smax}, d}$ 和 $P_{\text{smin}, d}$ 分别为储能放电功率上、下限。

3 求解方法

由于梯级水火风光储的多能互补协调优化调度所涉及的变量以及约束条件较多, 为简化计算流程, 本文采用分层优化调度的方式分为上、下层模型进行优化求解。

上层模型以净负荷波动最小为目标函数, 即通过优化梯级水电的出力减小上层模型输入到下层模型中等效负荷曲线的峰谷差, 从而可以减小火电机组对剩余负荷削峰填谷的压力。在上层模型中采用一种改进的沙丘猫群优化算法进行优化求解, 在该算法中考虑了 Circle 映射策略、三角形游走策略、Levy 飞行游走策略以及精英反向学习策略, 以此得到净负荷波动最小的梯级水电最优出力。

下层模型接收经平抑后的等效负荷曲线, 考虑包含煤耗成本、启停成本、阶梯型碳交易成本、深度调峰机组损耗成本和投油成本等在内的三部分成本, 以综合成本最小为目标函数。采用 CPLEX 对目标函数分段线性化进行求解, 得到各电源最优出力情况。

3.1 SCSO 优化算法

沙丘猫群优化算法 (sand cat swarm optimization, SCSO) 是 2022 年由 Seyyedabbasi 等人提出的

一种新元启发式算法^[23]。首先根据式(23)随机初始化沙丘猫在搜索空间中的位置。

$$x_{i,j} = l_j + r_1 \times (u_j - l_j) \quad (23)$$

式中： $x_{i,j}$ 为沙丘猫在搜索空间中的位置； u_j 和 l_j 分别为决策变量在维度 j 的上、下界； i 和 j 分别为种群数量与维度； r_1 为区间 $[0, 1]$ 内的随机数。

沙丘猫的猎物搜索和捕食机制依赖于低频噪声发射，其可以感知低于2 kHz的低频。假设沙丘猫的敏感范围 $\vec{r}_G$ 为2 kHz到0，其值会随着迭代过程线性降低，以逐渐靠近猎物而不会丢失或者跳过。

$$\vec{r}_G = s_M - \left(\frac{s_M \times t_c}{t_{\max}} \right) \quad (24)$$

式中： $\vec{r}_G$ 为灵敏系数向量集； s_M 为沙丘猫的听觉特性，假设为2； t_c 为当前迭代次数； $t_{\max}$ 为最大迭代次数。

为避免陷入局部最优，每只沙丘猫的灵敏度范围是不同的。

$$\vec{r} = \vec{r}_G \times r_2 \quad (25)$$

式中： $\vec{r}$ 为灵敏度范围向量集； r_2 为区间 $[0, 1]$ 内的随机数。

控制探索阶段和开发阶段之间转换的主要参数为 R ，当 $|R| > 1$ 时，为探索阶段；否则为开发阶段。

$$\vec{R} = 2 \times \vec{r}_G \times r_3 - \vec{r}_G \quad (26)$$

式中： $\vec{R}$ 为阶段选择参数向量集； r_3 为区间 $[0, 1]$ 内的随机数。

1) 探索阶段：搜索猎物

在该阶段中，沙丘猫根据最优解、当前位置以及灵敏度范围来更新最优位置。

$$\vec{P}_{os}(t+1) = \vec{r} \cdot (\vec{P}_{os,b}(t) - r_4 \cdot \vec{P}_{os,c}(t)) \quad (27)$$

式中： $\vec{P}_{os}(t+1)$ 为更新后种群位置； $\vec{P}_{os,b}(t)$ 为种群当前迭代次数 t 下的位置； $\vec{P}_{os,c}(t)$ 种群当前迭代次数 t 下的最优位置； r_4 为区间 $[0, 1]$ 内的随机数。

2) 开发阶段：攻击猎物

在该阶段中，利用轮盘赌选择算法为每只沙丘猫选择一个随机角度，同时根据式(28)更新随机位置，以确保沙丘猫可以更好的靠近猎物，再根据式(29)更新最优位置。

$$\vec{P}_{os,md}(t) = \left| r_5 \times \vec{P}_{os,b}(t) - \vec{P}_{os,c}(t) \right| \quad (28)$$

$$\vec{P}_{os}(t+1) = \vec{P}_{os,b}(t) - \vec{r} \times \vec{P}_{os,md} \times \cos \theta \quad (29)$$

式中： $\vec{P}_{os,md}(t)$ 为迭代次数 t 下的随机位置； r_5 为区间 $[0, 1]$ 内的随机数； θ 为轮盘赌法选择的随机角度。

3.2 MSCSO优化算法

为解决在复杂问题中SCSO算法后期迭代易陷入局部最优的问题，以及为提高SCSO算法的求解性能和全局搜索能力，本文提出了一种MSCSO算法，其计算流程如图1所示。

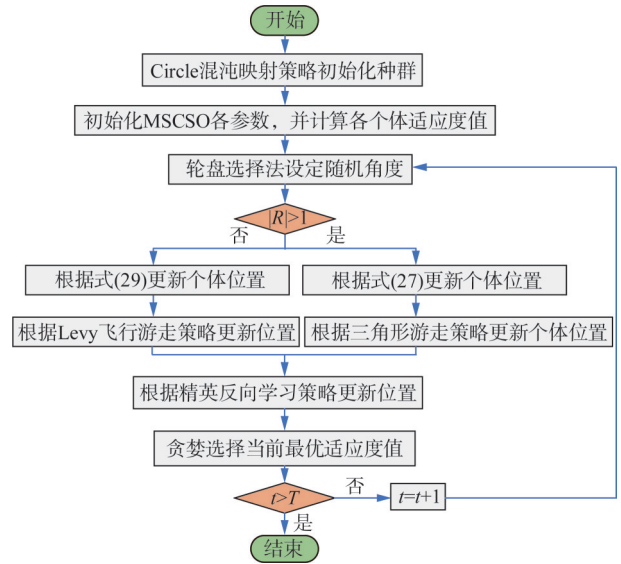


图1 MSCSO计算流程

Fig. 1 Flow chart of MSCSO calculation

3.2.1 Circle映射策略

为使初始化种群具有更好的随机性和分布性，可搜索的涵盖范围更广，利用Circle映射策略对种群进行初始化，表达式如下。

$$x_{i,j+1} = \text{mod} \left(x_{i,j} + 0.2 - \left(\frac{0.5}{2\pi} \right) \sin(2\pi x_{i,j}), 1 \right) \quad (30)$$

式中 $\text{mod}(\cdot)$ 为取余运算。

3.2.2 三角形游走策略

利用三角形游走策略使沙丘猫在靠近猎物的同时在周围进行游走，可以提高算法的全局搜索能力，通过式(32)可得沙丘猫游走后更新的位置。

$$\begin{cases} \alpha = 2 \times \pi \times r_6 \\ \vec{L}_1 = \vec{P}_{os,b}(t) - \vec{P}_{os,c}(t) \\ \vec{L}_2 = r_7 \times \vec{L}_1 \\ \vec{L}_3 = \vec{L}_1^2 + \vec{L}_2^2 - 2 \times \vec{L}_1 \times \vec{L}_2 \times \cos \alpha \end{cases} \quad (31)$$

$$\vec{P}_{os,new}(t) = \vec{P}_{os,c}(t) + \vec{r} \times \vec{L}_3 \quad (32)$$

式中： α 为随机游走角度； $\vec{L}_1$ 为种群当前解与当前

最优解之间的距离向量集; $\vec{L}_2$ 为随机游走步长向量集; $\vec{L}_3$ 为三角形游走步长向量集; $\vec{P}_{os, new}(t)$ 为迭代次数 t 下更新后的位置; r_6 和 r_7 为区间 $[0, 1]$ 内的随机数。

3.2.3 Levy飞行游走策略

Levy飞行游走策略的飞行轨迹由小概率的大步长与大概率的小步长组成,能够较好地均衡算法的全局搜索能力与局部开发能力。沙丘猫在攻击猎物阶段与猎物的距离接近,利用Levy飞行策略可以使沙丘猫尽可能在猎物旁边进行游走。

$$\begin{cases} \vec{P}_{os, new}(t) = \vec{P}_{os, b}(t) + (\vec{P}_{os, b}(t) - \vec{P}_{os, c}(t)) \times C \times z \\ z = \frac{u}{|v|^{1/\beta}} \\ u \sim N(0, \delta_u^2) \\ v \sim N(0, \delta_v^2) \\ \delta_u = \left\{ \frac{\Gamma(1+\beta) \sin(\pi\beta/2)}{\Gamma[(1+\beta)/2] \beta 2^{(\beta-1)/2}} \right\}^{1/\beta} \\ \delta_v = 1 \end{cases} \quad (33)$$

式中: C 为Levy飞行常数,控制游走步长的权重,令其为0.35; z 为Levy游走步长; u 和 v 为服从正态分布的随机数; δ_u 和 δ_v 为标准差; β 为区间 $[0, 2]$ 内的随机数; $\Gamma(t) = \int_0^\infty e^{-x} x^{t-1} dx$ 为gamma运算。

3.2.4 精英反向学习策略

采用精英反向学习策略,生成一个反向的搜索位置,可以使算法在一定程度上冲破局部最优的限制,扩大搜索范围,表达式如式(34)所示。

$$\vec{P}_{os, new}(t) = r_8 \times (u_j + l_j) - \vec{P}_{os, c}(t) \quad (34)$$

式中 r_8 为区间 $[0, 1]$ 内的随机数。

4 算例分析

本文采用一个修改的IEEE 30节点进行算例仿真分析,该系统中包括5台火电机组、3台梯级水

电机组、1台磷酸铁锂电池储能机组、1个光伏电站、1个风电场。其中火电机组和储能机组参数详见文献[14],梯级水电机组参数见表1。火电机组损耗成本和投油成本相关参数详见文献[26-27]。弃风、弃光惩罚成本系数均为500元/MWh。旋转备用为负荷的10%。火电机组不投油和投油阶段补偿电价分别为200、500元/MWh。风电、光伏预测功率及典型负荷曲线如图2所示。碳交易基本价格为252元/t,单位电量排放基准参考国家公布“基准线排放因子”^[28],阶梯长度区间为3000t,价格增长系数为25%,免费配额为机组容量的50%。

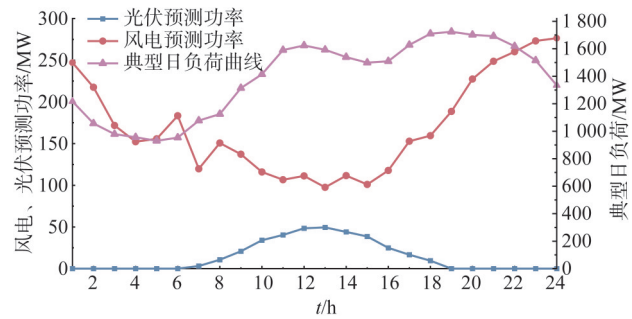


图2 风电、光伏预测功率及典型日负荷曲线

Fig. 2 Wind and PV forecast power and typical daily load curves

本文设置5种情况进行仿真的对比分析,具体情景如表2所示。

4.1 上层模型优化结果分析

为验证梯级水电用于系统调峰的有效性以及MSCSO在求解优化问题上的优越性,同时采用MSCSO、SCSO、麻雀搜索优化算法(sparrow search algorithm, SSA)、灰狼优化算法(grey wolf optimization, GWO)、海洋捕食者优化算法(marine predators algorithm, MPA)、飞蛾扑火优化算法(moth-flame optimization, MFO)、粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO)、鲸鱼优化算法(whale optimization algorithm, WOA)对上层

表1 梯级水电机组参数

Tab. 1 Parameters of cascade hydropower units

机组编号	最大库容 /亿 m ³	死库容 /亿 m ³	初始库容 /亿 m ³	综合出力系数	最大发电流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	最小发电流量/ (m ³ ·s ⁻¹)
1	44.97	11.36	20	8.4	250	70
2	8.64	3.74	5	8.35	500	200
3	1.69	1.01	1.2	8.4	750	250

表 2 仿真场景设置

Tab. 2 Settings of simulation scenes

场景	碳交易类型	调峰类型	是否考虑储能
1	传统	常规	否
2	传统	常规	是
3	传统	深度	是
4	阶梯	常规	是
5	阶梯	深度	是

模型进行优化求解，将每个算法的迭代次数设置为 500 次，种群规模统一为 50 个，其它参数设置参考文献[24–25]，求解结果如表 3 所示，可视化结果如图 3—4 所示。

表 3 8 种算法优化求解结果对比

Tab. 3 Comparison of the optimization results of eight algorithms

	负荷波动差 /MW	负荷峰谷差 /MW	迭代收敛时间 /s
原始负荷	5 800. 50	785	
MSCSO	872. 11	233	5. 78
SCSO	1 431. 53	499	4. 72
GWO	1 063. 54	291	2. 61
MPA	888. 70	260	4. 98
MFO	901. 62	235	4. 56
PSO	3 010. 15	762	2. 39
SSA	2 565. 74	538	3. 06
WOA	1 998. 86	561	2. 45

结合表 3 和图 3 的 8 种算法对上层模型的优化求解结果可以看出，各算法所求得的负荷波动差以及负荷峰谷差均小于原始负荷 5 800. 50 MW 的负荷波动差以及 785 MW 的负荷峰谷差，从而可知梯级水电可以在一定程度上有效减小负荷波动，平滑负荷曲线，从而减轻火电机组的调峰压力。同时，对比分析 8 种算法的求解结果可知，MSCSO 优化结

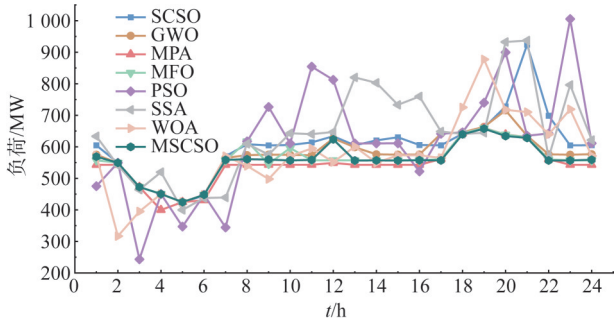


图 3 8 种算法优化求解后等效负荷曲线

Fig. 3 Equivalent load curves after 8 algorithms optimized solution

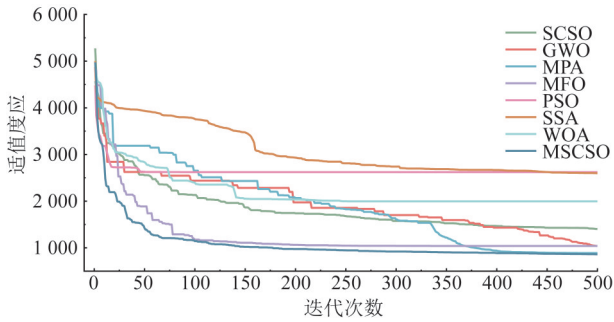


图 4 8 种算法优化迭代曲线

Fig. 4 Optimization iteration curves of 8 algorithms

果中负荷波动差以及负荷峰谷差均为最小，分别为 872. 11 MW 和 233 MW，优化后的等效负荷曲线更为平滑。另外，由图 4 可以看出，8 种优化算法中 MSCSO 在具有最优求解结果的同时迭代收敛速度也较快，可以发现 MSCSO 在该情景假设下具有更为优越的优化效果，在用于求解更为复杂的电力系统优化调度情景中具有更好的求解前景。

4. 2 下层模型优化结果分析

下层模型优化求解结果如表 4 所示，可视化结果如图 5 所示，可以看出所有情景均满足负荷需求。

对比场景 1、2 可以发现，场景 2 的总成本、弃

表 4 各场景下优化求解结果

Tab. 4 Optimization solution results in various scenarios

场景	总成本/ 万元	碳交易成本/ 万元	火电机组运行 成本/万元	储能成本/ 万元	弃风成本/ 万元	碳排放量/t	火电调峰利润/ 万元	弃风率/%
1	323. 97	93. 05	318. 26		5. 71	9 191. 85		2. 80
2	320. 29	91. 29	316. 02	3. 41	0. 86	9 121. 96		0. 42
3	303. 39	90. 29	299. 40	3. 51	0. 48	9 082. 32	9. 29	0. 24
4	317. 59	88. 94	313. 52	3. 40	0. 67	9 022. 83		0. 33
5	300. 12	87. 56	296. 48	3. 64	0	8 978. 98	9. 41	0

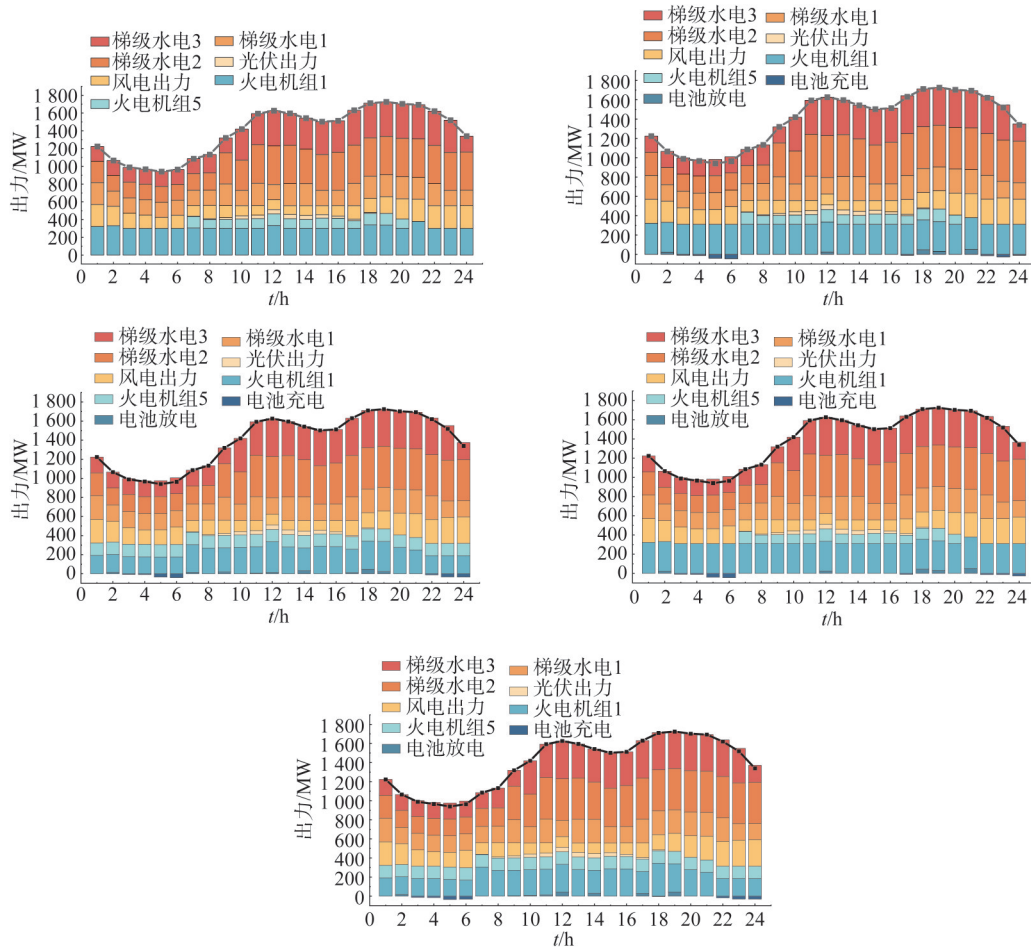


图5 各场景下各机组出力情况

Fig. 5 Outputs of each unit in each scenario

风量、弃风成本分别减少了3.68万元、2.38%、4.85万元,同时储能成本增加了3.41万元。由此得知,当储能接入系统联合运行后,系统的弃风率和弃风成本大幅减少,这是由于储能系统自身“低储峰放”的灵活特性,能够有效应对风光出力的波动性。同时弃风成本的大幅减少足以弥补增加储能系统的成本,但目前作用效果仍受限于容量约束。

分别对比场景2、4和场景3、5可以发现,场景4的碳排、碳成本、总成本分别降低了99.13 t、2.35万元、2.7万元;场景5的则分别降低了103.34 t、2.73万元、3.27万元。由此得知,碳交易机制中阶梯型相较于传统的更能有效降低碳排。这是因为在传统碳交易机制下,相比于煤耗成本系数,碳排系数影响较小,系统会优先考虑能够大幅度限制其余成本的火电机组,使其低成本出力,而在阶梯型碳交易机制下,由于阶梯区间价格的递

增,系统则会优先选取低碳且低成本的机组出力,重新合理分配机组运行。在考虑阶梯型碳交易机制后,系统的总成本、碳交易成本以及碳排放量均会减少,这表明在阶梯型碳交易机制下系统能在减排的同时保证较低的运行成本。

分别对比场景2、3和场景4、5可以发现,场景3弃风率、总成本、火电机组运行成本分别降低了0.18%、16.9万元、16.62万元;场景5的则分别降低了0.33%、17.47万元、17.04万元。同时,场景3和场景5的储能成本分别上升了0.1万元、0.23万元。由此得知,深度调峰的特性使得系统弃风量减少,具有一定的节煤效益,而所产生的效益可以在一定程度上忽略深度调峰带来的增量成本。同时,火电机组进行深度调峰后不受常规调峰时最低出力的限制,运行成本较小的火电机组G5会代替G1的部分出力,从而能够降低系统运行总成本。

这表明深度调峰能够提高系统的灵活性,减少弃风量,结合阶梯型碳交易机制,机组重分配运行减排效果更优,结合储能综合效益更优。

5 结论

本文针对“双碳”减排目标以及新能源并网发电带来的电力系统调峰问题提出了一种考虑阶梯型碳交易的梯级水火风光储多能联合调度模型,并在IEEE30节点中验证了该模型的有效性,主要结论如下。

1) 在传统经济调度中,阶梯型碳交易机制的使用比传统碳交易更能减少系统中的碳排放量,促进火电机组出力的再分配,具有一定的低碳性与经济性。

2) 本文所提出的考虑阶梯型碳交易的梯级水火风光储分层优化调度策略利用梯级水电以及储能系统辅助火电机组深度调峰,该策略下可以有效平抑负荷波动,减小火电机组调峰压力,减少弃风、弃光量,从而提升系统灵活性,减少系统运行总成本。

3) 本文在SCSO的基础上考虑了Circle映射策略、三角形游走策略、Levy飞行策略以及精英反向学习策略,提出了一种改进后的MSCSO,在上层模型中分别与其他7种算法一起优化求解,MSCSO能够搜索到负荷峰谷差和负荷波动差更小的等效负荷曲线。

参考文献

- [1] LIU D, LUO Z, QIN J, et al. Low-carbon dispatch of multi-district integrated energy systems considering carbon emission trading and green certificate trading [J]. Renewable Energy, 2023(218): 960 – 1481.
- [2] GREEN J F. Does carbon pricing reduce emissions? a review of ex post analyses [J]. Environmental Research Letters, 2021, 16(4): 043004.1 – 043004.18.
- [3] JIN X, LIU B, LIAO S, et al. Impacts of different wind and solar power penetrations on cascade hydroplants operation [J]. Renewable Energy, 2022(182): 227 – 244.
- [4] GUO R, YE H, ZHAO Y. Low carbon dispatch of electricity-gas-thermal-storage integrated energy system based on stepped carbon trading [J]. Energy Reports, 2022(8): 449 – 455.
- [5] QI X, ZHENG J, MEI F, et al. Low carbon economic dispatch of integrated energy systems considering stepped carbon trading [C]// 2023 7th International Conference on Green Energy and Applications (ICGEA), March 10 – 12, 2023, Singapore, Singapore. New York: IEEE, 2023: 66 – 71.
- [6] 韩莹, 于三川, 李苹一, 等. 计及阶梯式碳交易的风光氢储微电网低碳经济配置方法 [J]. 高电压技术, 2022, 48(7): 2523 – 2533.
- [7] HAN Ying, YU Sanchuan, LI Luoyi, et al. Low-carbon economic allocation of wind-hydrogen-storage microgrids taking into account stepwise carbon trading [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(7): 2523 – 2533.
- [7] 刘光宇, 韩东升, 刘超杰, 等. 考虑双重需求响应及阶梯型碳交易的综合能源系统双时间尺度优化调度 [J]. 电力自动化设备, 2023, 43(5): 218 – 225.
- [8] LIU Guangyu, HAN Dongsheng, LIU Chaojie, et al. Dual time-scale optimal scheduling of integrated energy system considering dual demand response and stepped carbon trading [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(5): 218 – 225.
- [8] 赵毅, 王维庆, 闫斯哲. 考虑阶梯型碳交易的风光储联合系统分布鲁棒优化调度 [J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 127 – 136.
- [9] ZHAO Yi, WANG Weiqing, YAN Sizhe. Distributional robust optimal scheduling of combined wind power and storage system considering stepped carbon trading [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 127 – 136.
- [9] 陈荃, 张丹宏, 郑淇源, 等. 电-碳-绿证市场耦合下发电商报价与出清双层优化 [J]. 南方电网技术, 2024, 18(1): 121 – 133.
- [10] CHEN Quan, ZHANG Danhong, ZHENG Qiyuan, et al. Bilevel optimization of power generation companies' bidding and clearing in the coupled electricity-carbon-green certificate market [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(1): 121 – 133.
- [10] SHARMA S, MORTAZAVI M. Pumped thermal energy storage: a review [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2023(213): 124286.1 – 124286.15.
- [11] ZHANG Z, CONG W, LIU S, et al. Auxiliary service market model considering the participation of pumped-storage power stations in peak shaving [J]. Frontiers in Energy Research, 2022(10): 915125.1 – 915125.19.
- [12] ROCHA A V, MAIA T A C, FILHO B J C. Improving the battery energy storage system performance in peak load shaving applications [J]. Energies, 2022, 16(1): 382 – 394.
- [13] 何耿生, 陈晖, 张世旭, 等. 储能提升高比例新能源基地低碳-经济-可靠性能的效益分析 [J]. 南方电网技术, 2024, 18(4): 120 – 129.
- [14] HE Gengsheng, CHEN Hui, ZHANG Shixu, et al. Benefit analysis of energy storage in enhancing the low-carbon, economic and reliable performance of high-proportion renewable energy bases [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(4): 120 – 129.
- [14] 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.
- [15] LI Tie, LI Zhengwen, YANG Junyou, et al. Optimized scheduling of wind-water-fire-storage multi-energy system complementary coordination taking into account the peaking initiative [J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 3622 – 3630.
- [15] WANG Z, FANG G, WEN X, et al. Coordinated operation of conventional hydropower plants as hybrid pumped storage hydropower with wind and photovoltaic plants [J]. Energy Conversion and Management, 2023 (277): 116654.1 –

116654. 17.
- [16] WANG X, ZHAO Y, HUANG W, et al. Complementary operation optimization of multi-energy power systems considering water sensitivity of pumped storage and deep regulation of thermal power plants [C]//2022 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I&CPS Asia), July 8 - 11, 2022, Shanghai, China. New York: IEEE, 2022: 484 - 489.
- [17] 曹韵, 韩松, 荣娜, 等. 基于GCTMSA的梯级水火风光蓄储联合调度[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(3): 108 - 116.
- CAO Yun, HAN Song, RONG Na, et al. Joint scheduling of gradient water-fire-wind-solar storage based on GCTMSA [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(3): 108 - 116.
- [18] 罗彬, 陈永灿, 刘昭伟, 等. 梯级水光互补系统最大化可消纳电量期望短期优化调度模型[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(10): 66 - 75.
- LUO Bin, CHEN Yongcan, LIU Zhaowei, et al. Short-term optimal scheduling model for maximizing the expected short-term optimal dispatch of consumable power in a terraced water-photovoltaic complementary system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(10): 66 - 75.
- [19] 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. Thermoelectric optimization of integrated energy system considering stepped carbon trading mechanism and electric hydrogen production [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 48 - 55.
- [20] 崔杨, 周慧娟, 仲悟之, 等. 考虑火电调峰主动性与需求响应的含储能电力系统优化调度[J]. 高电压技术, 2021, 47(5): 1674 - 1684.
- CUI Yang, ZHOU Huijuan, ZHONG Wuzhi, et al. Optimal scheduling of power systems with energy storage considering thermal power peaking initiative and demand response [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1674 - 1684.
- [21] 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. Simplified grid current calculation method based on power transfer distribution factor [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(17): 25 - 30.
- [22] 吴雄, 贺明康, 何雯雯, 等. 考虑储能寿命的风-光-火-储打捆外送系统容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(15): 66 - 75.
- WU Xiong, HE Mingkan, HE Wenwen, et al. Optimal capacity allocation of wind-photovoltaic-fire-storage bundled outgoing system considering storage lifetime [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(15): 66 - 75.
- [23] SEVVEDABBASI A, KIANI F. Sand cat swarm optimization: a nature-inspired algorithm to solve global optimization problems [J]. Engineering with Computers, 2023(39): 2627 - 2651.
- [24] SEYEDAIL M. Moth-flame optimization algorithm: a novel nature-inspired heuristic paradigm [J]. Knowledge-Based Systems, 2015(7): 89 - 111.
- [25] AFSHIN F, MOHAMMAD H, SEYEDAIL M. Marine predators algorithm: a nature-inspired metaheuristic [J]. Expert Systems with Applications, 2020, 152(8): 1 - 28.
- [26] 林俐, 邹兰青, 周鹏, 等. 规模风电并网条件下火电机组深度调峰的多角度经济性分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(7): 21 - 27.
- LIN Li, ZOU Lanqing, ZHOU Peng, et al. Multi-angle economic analysis of deep peaking of thermal power units under grid-connected conditions of large-scale wind power [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(7): 21 - 27.
- [27] 赵书强, 吴杨, 李志伟, 等. 考虑风光出力不确定性的电力系统调峰能力及经济性分析[J]. 电网技术, 2022, 46(5): 1752 - 1761.
- ZHAO Shuqiang, WU Yang, LI Zhiwei, et al. Peaking capacity and economic analysis of power systems considering wind-wind output uncertainty [J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1752 - 1761.
- [28] 国家应对气候变化战略研究和国际合作中心. 2023年减排项目中国区域电网基准线排放因子[R]. http://www.ncsc.org.cn/SY/zywj/202407/t20240709_1081217.shtml, 2024.

收稿日期:2023-10-30; 网络首发日期:2024-05-30

作者简介:

田珺玲(2000), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统优化运行与控制, 779251611@qq.com;

荣娜(1979), 女, 通信作者, 讲师, 硕士生导师, 博士, 研究方向为电力系统与综合能源、电力电子装备与系统;

张裕(1983), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为电网分析、线损与节能分析。