

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230933

基于多目标原子轨道搜索算法的风电场集群最优经济调度

程先龙¹, 王川¹, 张杰¹, 易佳兵¹, 周云霞¹, 李思莹¹, 杨博²

(1. 云南电网有限责任公司红河供电局, 云南 红河 651400; 2. 昆明理工大学电力工程学院, 云南 昆明 650500)

摘要: 随着环保意识的增强以及风电渗透率的不断攀升, 使得电力部门对含风电系统的经济调度提出了更高的要求。为了在降低污染物排放及促进风电消纳的同时将发电成本控制在最低, 建立了考虑环境与经济指标的风-火多随机变量经济调度模型。该模型中的目标函数考虑了火力发电成本、风力发电成本、弃风惩罚成本及污染气体排放。采用多目标原子轨道搜索算法进行模型求解, 该算法在传统原子轨道搜索算法的基础上添加了存档机制、网络机制以及领导者选择机制, 具有较强的多目标优化执行能力。结合修改后的 IEEE30 节点算例进行仿真分析, 结果验证了所提模型的可行性以及多目标原子轨道搜索算法求解此类问题的有效性。

关键词: 多目标原子轨道搜索算法; 风电场集群; 最优经济调度

Optimal economic dispatch of wind farm clusters based on multi-objective atomic orbital search

CHENG Xianlong¹, WANG Chuan¹, ZHANG Jie¹, YI Jiabing¹, ZHOU Yunxia¹, LI Siying¹, YANG Bo²

(1. Honghe Power Supply Bureau, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Honghe 651400, China; 2. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: The increasing awareness of environmental protection and the rising penetration rate of wind power have led the power sector to put forward higher requirements for the economic dispatch of wind power-containing systems. To reduce pollutant emission and promote wind power consumption while minimizing generation costs, this paper establishes a wind-fire multi-stochastic variable economic dispatch model considering environmental and economic indices, in which the objective function takes into account the costs of thermal and wind power generation, and of wind abandonment penalties, and pollutant gas emission. This paper adopts the multi-objective atomic orbital search algorithm (MOAOS) for model analysis. This adds archiving, grid and leader selection mechanisms on the basis of the traditional atomic orbital search algorithm (AOS), and has strong multi-objective optimization execution capability. The simulation results validate the feasibility of the proposed model and the effectiveness of the multi-objective stochastic painting optimization algorithm in solving such problems by combining the modified IEEE30-bus algorithm with simulation analysis.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 62263014).

Key words: multi-objective atomic orbital search; wind farm clustering; optimal economic dispatch

0 引言

风力发电作为一种清洁能源, 具有可再生、对环境无污染、装机规模灵活等优点^[1-2], 但由于其具有强烈的随机性、间歇性和波动性^[3], 当风电大规模集群接入电网时, 风电出力将存在不确定性、不可控性和反调峰特性等, 这势必对电力系统的安全、稳定经济运行提出挑战^[4]。此外, 我国的风资源应用广泛、储量大、分布广, 且大型风电基地所在地

大多以火力发电为主。因此, 研究风火联合的最优经济调度具有重要意义和实用价值, 这已成为当前的研究热点^[5-8]。

为应对风电的独特性, 国内外的研究从不同的角度和思路出发, 相继提出了很多风电机组与常规火电机组联合经济调度模型。文献[9]通过引入新能源分段惩罚因子来建立风-光-火联合经济优化模型, 并计算日时序出力下的风、光、火实际出力和经济效益指标, 模型求解采用模拟退火算法 (simulated annealing algorithm, SA) 和人工蜂群算法 (artificial bee colony algorithm, ABC) 相结合的算法,

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (62263014)

但其未考虑爬坡约束及新能源渗透率,算例研究部分缺乏普适性及对风电场群与不同场群之间出力特性联系的分析;文献[10]在考虑到阀点效应、平等约束和不平等约束的情况下,提出了基于风-光-火综合能源的混合型动态经济排放调度(hybrid dynamic economic emission dispatch, HDEED)数学模型,并针对该调度问题的非凸性、非线性和高维特性,提出了一种新型求解方法:基于位置干扰更新策略的飞蛾扑火优化算法(moth-flame optimization algorithm based on position disturbance updating strategy, MFO-PDU),但该模型没有充分考虑风能和光伏发电波动性的影响;文献[11]提出了基于二阶锥规划并计及新能源并入的机会约束经济调度(chance constrained economic dispatch, CCED)模型,其通过假设预测误差服从高斯正态分布,推导出CCED的二阶锥规划形式,从而将随机的优化问题进一步转变成为确定性非线性优化问题,并采用现代内点算法进行求解,但与常规经济调度相比,其优化效果略差;文献[12]构建了多源互补的风-火-水-储-气联合优化调度模型以实现优先消纳新能源且运行成本最小的目标,采用内点法对7机39节点系统进行测试计算。文献[11-12]均采用内点法求解,但对于大规模问题的求解,该方法占用内存较大且对算力有较高要求。文献[13]综合考虑风-火-水-气-核-抽水蓄能等的发电特性,建立了多类型能源协同调度的旋转备用优化模型,并提出将自适应遗传算法与分枝切割算法相结合形成双层优化算法来求解模型,然而,该模型具有较高的复杂性和求解难度,并且针对这类模型尚无直接有效的通用算法,这就导致其难以被广泛应用和推广;文献[14]将非支配排序遗传算法-II(non-dominated sorting genetic algorithm-II, NSGA-II)应用于风-光-火与电池能量储备的经济调度问题,但该研究主要考虑的是减少或最小化发电过程中的污染物排放量,并未过多分析新能源发电渗透率及各发电机组间的最优出力配比;文献[15]构建了一种整体考虑风电及负荷预测误差得到净负荷预测误差、并将净负荷预测计入正负旋转备用容量概率约束的优化调度模型,但该研究主要考虑降低备用成本、环境成本和发电总成本,并未考虑风火联合发电过程中对于系统网损的影响;文献[16]提出了一种混沌正余弦算法来提供最优发电计划,从而实现最小化发电成本和碳排放量,然而,该研究并没有考虑到新能源渗透率,使其缺乏一定的普适性。

在以上文献中,一些模型由于算法的缺陷可能得到的不是全局最优解,通常会陷入局部最优解,一些元启发式算法的提出及应用,使得非常困难的组合多目标问题也能得到全局或近似全局解。多目标原子轨道搜索算法(multi-objective atomic orbital search, MOAOS)也是元启发式算法的一种,它是原子轨道搜索算法(atomic orbital search, AOS)的改进算法,能较好地解决多目标优化问题。其灵感来源于量子力学原理,尤其是它的搜索优化原理是利用电子围绕原子核的运动规律来制定的。将电子从其轨道中释放出来需要一定的能量,这种能量被称为结合能。原子核周围的电子可以通过光子(光)的作用与粒子或磁场的相互作用而吸收或发射能量。如果一个电子吸收的能量小于其结合能,它将远离原子核,并过渡到外轨道的激发能级;反之,如果电子吸收的能量大于其结合能,那么它将被重新定位到内轨道的较低能级^[17]。

本文建立的风-火多随机变量的经济调度模型考虑了系统的网损、污染气体排放以及发电成本,经济调度目标为系统总成本函数最小。为了提高风电并网的适应性,在经济调度模型中引入了弃风惩罚成本函数,以解决风电发电的波动性和不可控性所带来的问题;此外,本文还综合考虑了新能源渗透率、风能波动性的影响,采用MOAOS对模型进行求解,并通过大量的仿真实验得到在不同新能源渗透率下(高渗透率和低渗透率)及不同负荷下(重负荷和轻负荷)各机组出力的最优配比。本文旨在为可再生能源发电系统的优化调度及经济组合提供较为科学合理的参考。

1 经济调度数学模型

该经济调度数学模型以涉及火力发电机组燃料成本、风力发电机组的维护和弃风成本以及污染气体排放的目标函数最小作为该系统的调度目标。同时,在该目标下,要满足整个系统的负荷平衡约束、火电机组和风电机组的输出功率限制这3个约束条件。

1.1 目标函数

整个系统的供给侧主要由火力发电场和风电场构成,它们产生的电能供给到需求侧。考虑到火电机组在运行过程中,各种各样的污染气体的排放与机组的注入功率有着紧密联系,故将该调度方式分为经济调度和环境调度两部分。总的目标函数(即系统总成本函数) F 可表示为

$$F = F(\mathbf{P}_G) + F(P_{G,\text{wind}}) + F(P_{GQ,\text{wind}}) + E(\mathbf{P}_G) \quad (1)$$

式中: $F(\mathbf{P}_G)$ 为火力发电机组燃料成本函数; $F(P_{G,\text{wind}})$ 为风电成本函数; $F(P_{GQ,\text{wind}})$ 为风电弃风惩罚成本函数; $E(\mathbf{P}_G)$ 为火力发电机组污染气体 (SO_2 、 NO_x) 排放量函数。

1.1.1 经济调度

火力发电机组运行时其发电成本主要为燃料成本, 其燃料成本曲线为一个二次函数, 故火力发电机组燃料成本函数 $F(\mathbf{P}_G)$ [18] 为

$$F(\mathbf{P}_G) = \sum_{i=1}^N (a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2), i=1, 2, \dots, N \quad (2)$$

式中: N 为发电系统中发电机组总数; a_i 、 b_i 、 c_i 为火力发电机组 i 的发电成本系数; P_{Gi} 为火力发电机组 i 的有功功率; \mathbf{P}_G 为发电系统中发电机组有功出力向量, 其表达式为

$$\mathbf{P}_G = [P_{G1}, P_{G2}, \dots, P_{GN}] \quad (3)$$

风能作为清洁能源, 虽然在运行过程中无能源消耗, 但是会存在建设成本及一些基本的运行维护成本, 因此其成本函数 $F(P_{G,\text{wind}})$ [19] 为

$$F(P_{G,\text{wind}}) = \sum_{j=1}^M \sum_{t=1}^T R_w P_{w,j}^t \quad (4)$$

式中: R_w 为风电场发电单位功率的成本系数; $P_{w,j}^t$ 为第 j 台发电机在 t 时刻的发电功率; M 为风电机组的数量; T 为时段数。

为了提高风电并网的适应性, 减少弃风现象, 在经济成本中加入了弃风惩罚成本。弃风惩罚成本函数 $F(P_{GQ,\text{wind}})$ [18] 为

$$F(P_{GQ,\text{wind}}) = \sum_{j=1}^M \sum_{t=1}^T g_j (P_{Sw,j}^t - P_{w,j}^t) \quad (5)$$

式中: $P_{Sw,j}^t$ 为第 j 个风电场在 t 时刻的预测功率; g_j 为第 j 个风电场的弃风成本。

1.1.2 环境调度

以减少污染气体的排放为目标的环境调度, 需要考虑火电机组发电过程中产生的各类有害气体的排放, 其中包括 SO_2 、 NO_x 等。由于各种污染气体排放量与机组实际注入系统的功率密切相关, 故火力发电机组污染气体的综合排放模型 [19] 为

$$E(\mathbf{P}_G) = \sum_{i=1}^N [10^{-2} (\alpha_i + \beta_i P_{Gi} + \gamma_i P_{Gi}^2) + \zeta_i e^{\lambda_i P_{Gi}}] \quad (6)$$

式中, α_i 、 β_i 、 γ_i 、 ζ_i 、 λ_i 为发电机组 i 的污染气体排放特性方程系数。

1.2 约束条件

1.2.1 等式约束条件

系统负荷平衡约束为

$$\sum_{i=1}^N P_{Gi} + \sum_{j=1}^M \sum_{t=1}^T R_w P_{w,j}^t - P_D - P_{\text{loss}} = 0 \quad (7)$$

式中: P_D 为负荷的有功功率; P_{loss} 为系统总传输网络损耗。

1.2.2 不等式约束

火力发电机组出力约束为

$$P_{Gi,\text{min}} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi,\text{max}}, i=1, 2, \dots, N \quad (8)$$

式中, $P_{Gi,\text{max}}$ 、 $P_{Gi,\text{min}}$ 分别为火力发电机组 i 的有功出力上下限。

风电机组出力约束为

$$0 \leq P_{w,j}^t \leq P_{w,\text{rate}}^t, j=1, 2, \dots, N \quad (9)$$

式中, $P_{w,\text{rate}}^t$ 为第 j 台风力机组在 t 时刻的额定功率。

1.2.3 系统损耗

系统损耗采取 B 系数法进行求解, 计算公式如式(10)所示 [19]。

$$P_{\text{loss}} = \sum_i \sum_j P_i B_{ij} P_j \quad (10)$$

式中: P_{loss} 为系统损耗; P_i 和 P_j 分别为机组 i 和机组 j 的有功功率; B_{ij} 为机组 i 和机组 j 之间的网损系数。

利用 B 系数法进行功率平衡时, 在算法中设置出力最大的一个火电机组为调节机组, 根据文献 [18] 的方法求解调节机组有功出力, 当调节机组功率超出功率范围时, 按其余机组剩余可调功率容量比值将越限部分分配给其余机组, 进一步避免其余机组越限。此时, 计算得到的系统损耗与重新分配后再次计算的系统损耗差异较大。因此, 再将分配好的机组采用上述方法再计算一次, 此时, 调节机组的范围可以在机组出力范围内, 不需要分配多余功率给其余机组。通过再次循环计算后, 调节前后的系统损耗差值较小。

1.2.4 折衷最优解

采用模糊数学法计算帕累托最优前沿的解的满意度, 选择满意度最大的解作为折衷最优解。各帕累托前沿在某一维目标函数中的满意度 [20] 为

$$\mu_l^n = \begin{cases} 1, & f_l^n \leq f_l^{n,\text{min}} \\ \frac{f_l^{n,\text{max}} - f_l^n}{f_l^{n,\text{max}} - f_l^{n,\text{min}}}, & f_l^{n,\text{min}} \leq f_l^n \leq f_l^{n,\text{max}} \\ 0, & f_l^n \geq f_l^{n,\text{max}} \end{cases} \quad (11)$$

式中: f_l^n 为第 l 个最优解的第 n 维目标函数值, $n \in \{1, 2, \dots, N\}$; $f_l^{n,\text{max}}$ 和 $f_l^{n,\text{min}}$ 分别为第 n 维目标函数的最大值和最小值。

各帕累托最优解的满意度 μ_l 为

$$\mu_i = \frac{\sum_{n=1}^N \mu_i^n}{\sum_{l=1}^{N_c} \sum_{n=1}^N \mu_l^n} \quad (12)$$

式中, N_c 为帕累托前沿上候选解个数。

1.2.5 结果评价

本文在进行经济调度时, 考虑系统的网损、污染物排放以及发电成本进行多目标经济调度时, 很难每个目标都取到最优值, 因此采取权重的方式计算最终得分。由于不同目标单位不同, 先进行归一化计算, 如式(13)所示。

$$x_q = \frac{x_q - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (13)$$

式中: x_q 表示第 q 个算法运行结果的归一化, $q=1, 2, \dots, C$; x_{\max} 、 x_{\min} 分别表示所有算法运行结果的最大值和最小值。

计算每个算法的运行结果得分 S_q 。

$$S_q = 1 - (d_1 F_{G,q} + d_2 E_q + d_3 P_{\text{loss},q}) \quad (14)$$

式中: S_q 表示第 q 个算法的运行结果, 在[0,1]之间, 其值越接近 1, 调度运行结果越好; $F_{G,q}$ 、 E_q 、 $P_{\text{loss},q}$ 分别对应第 q 个算法得到的系统发电成本、碳排放以及网损; d_1 、 d_2 、 d_3 表示对应的权重。

2 基于多目标原子轨道搜索算法的风电场集群最优经济调度

2.1 原子轨道搜索算法

原子轨道搜索算法(atomic orbital search algorithm, AOS)其灵感来源于量子力学原理, 尤其是电子围绕原子核的运动规律: 如果一个电子吸收的能量小于其结合能, 它将远离原子核, 并过渡到外轨道的激发能级; 反之, 则将被重新定位到内轨道的较低能级。电子在原子中的运动行为示意图如图 1^[21]所示。

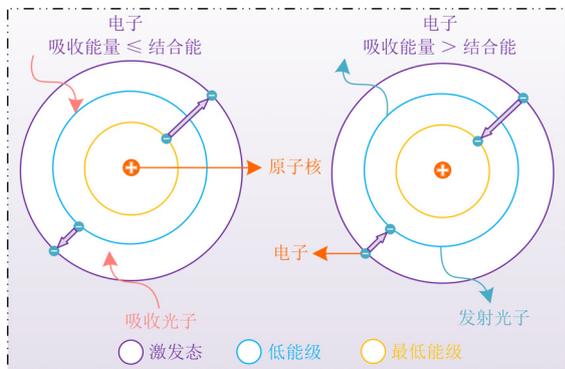


图 1 电子在原子中的运动行为示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the behavior of electrons in atoms

2.1.1 初始化

模拟原子核周围电子的候选解的初始位置为

$$x_r^s(0) = x_{r,\min}^s + \text{rand.}(x_{r,\max}^s - x_{r,\min}^s), \begin{cases} r = 1, 2, \dots, m \\ s = 1, 2, \dots, d \end{cases} \quad (15)$$

式中: $x_r^s(0)$ 为候选解的初始位置; $x_{r,\max}^s$ 、 $x_{r,\min}^s$ 分别为第 r 个候选解的第 s 个决策变量的最大值和最小值; rand. 是一个在[0,1]范围内均匀分布的随机数。电子在原子核周围的位置由概率密度函数(probability density function, PDF)决定, 如图 2 所示, 原子中具有最低能级的电子即为具有最佳目标函数值的候选解。

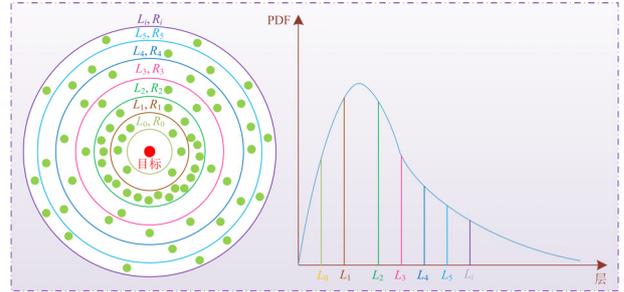


图 2 PDF 决定候选解分布情况示意图

Fig. 2 Schematic diagram of PDF determining the distribution of the candidate solutions

2.1.2 结合态和结合能

确定搜索阶段候选解的结合态和结合能。

$$B_{\text{state}}^z = \frac{\sum_{r=1}^k A_r^z}{k}, \begin{cases} r = 1, 2, \dots, k \\ z = 1, 2, \dots, p \end{cases} \quad (16)$$

$$B_{\text{energy}}^z = \frac{\sum_{r=1}^k B_r^z}{k}, \begin{cases} r = 1, 2, \dots, k \\ z = 1, 2, \dots, p \end{cases} \quad (17)$$

式中: B_{state}^z 和 B_{energy}^z 分别表示第 z 层的结合态和结合能; A_r^z 和 B_r^z 分别为候选解 r 在第 z 层中的位置和适应度值; p 为总层数; k 表示第 z 层候选解总数。

原子的结合态和结合能分别为

$$B_{\text{state}} = \frac{\sum_{r=1}^m A_r}{m}, r = 1, 2, \dots, m \quad (18)$$

$$B_{\text{energy}} = \frac{\sum_{r=1}^m B_r}{m}, r = 1, 2, \dots, m \quad (19)$$

式中: B_{state} 和 B_{energy} 分别为原子的结合态和结合能; A_r 和 B_r 分别为该候选解在原子中的位置和目标函数值; m 为搜索空间中候选解总数。

2.1.3 探索阶段

光子速率(photon rate, PR)表示光子对电子作用的概率, 用 R_p 表示光子速率。如果每个电子的随机生成数 $\varphi < R_p$, 则电子的运动与粒子或磁场的相互作用有关, 搜索空间将进一步探索, 这时候选解通过式(20)更新位置。

$$x_{r+1}^z = x_r^z + \mathbf{u}_r, \begin{cases} r=1,2,\dots,k \\ z=1,2,\dots,p \end{cases} \quad (20)$$

式中: x_r^z 和 x_{r+1}^z 分别是第 z 层第 r 个候选解的当前位置和未来位置; \mathbf{u}_r 是一个向量, 包含在 $[0, 1]$ 范围内均匀分布的随机数。

2.1.4 开发阶段

如果 $\varphi \geq R_p$, 此时电子的运动基于光子的发射和吸收。若候选解在某一层的能级高于该层的结合能($E_r^z \geq B_{\text{energy}}^z$), 则位置更新如式(21)所示^[22]。

$$x_{r+1}^z = x_r^z + \frac{\eta_r \times (\sigma_r \times L_{\text{energy}}^z - \delta_r \times B_{\text{state}}^z)}{z}, \begin{cases} r=1,2,\dots,k \\ z=1,2,\dots,p \end{cases} \quad (21)$$

式中: x_{r+1}^z 和 x_r^z 分别表示第 z 层候选解的更新位置和当前位置; LE 表示全局最佳位置; η_r 、 σ_r 和 δ_r 是介于 $[0, 1]$ 之间的随机数。

如果 $E_r^z < B_{\text{energy}}^z$, 则位置更新如式(22)所示。

$$x_{r+1}^z = x_r^z + \eta_r \times (\sigma_r \times L_{\text{energy}}^z - \delta_r \times B_{\text{state}}^z), \begin{cases} r=1,2,\dots,k \\ z=1,2,\dots,p \end{cases} \quad (22)$$

式中, L_{energy}^z 表示第 z 层能级最低的电子。

2.2 基于多目标原子轨道搜索算法的风电场集群最优经济调度设计

多目标原子轨道搜索算法(multi-objective atomic orbital search, MOAOS)具有 AOS 的所有特征, 在探索或开发搜索空间时都以相同的方式运行, 最重要的区别在于: AOS 仅存储和改进可用的最优解, 而 MOAOS 则围绕一组存档数据进行搜索; 此外, MOAOS 包含存档机制、网络机制和领导者选择机制 3 种多目标优化机制, 这使得该算法可以很好地解决多目标优化问题。存档机制使它可以作为一个存储模块, 用于存储或恢复得到的最优解; 网络机制用于增强存档中的非主导解; 领导者选择机制将多目标搜索空间中的解决方案与该机制进行比较, 搜索领导者引导其他候选搜索者到搜索空间的可能区域, 以获得接近全局最优的解。

首先, 将负荷、风电、火电机组数据输入算法, 对机组出力进行初始化, 然后将数据输入算法模型中, 选定求解目标函数, 对机组出力情况进行迭代并保存局部最优解, 最后得到最终的帕累托前沿, 根据折衷最优解选定机组出力, 得到某个时刻的机组出力情况, 再重复上述步骤, 得到所有时刻的机组出力情况并统计结果。本文所采用算法的总体求解流程图如图 3 所示。

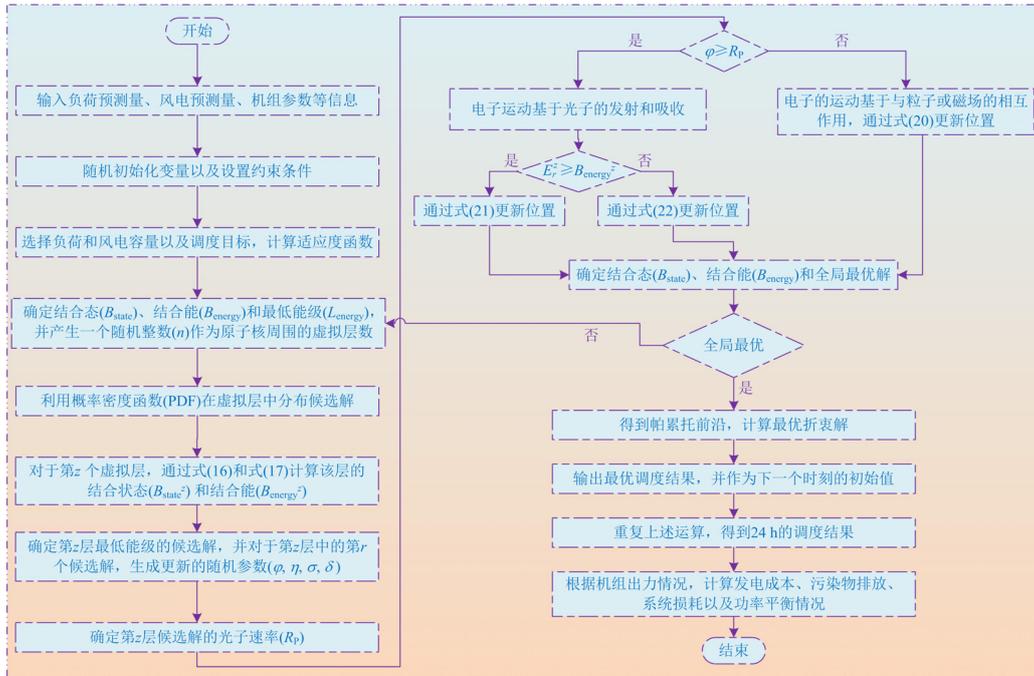


图 3 基于多目标原子轨道搜索算法的风电场集群最优经济调度求解流程图

Fig. 3 Flowchart of wind farm cluster optimal economic dispatch solution based on MOAOS

3 算例分析

本文采用 IEEE30 节点系统对电力系统经济调度进行分析,系统有 5 个火电机组和 1 个风电机组,考虑系统的网损、污染气体排放以及发电成本,并通过调节容量参数改变风电容量的占比和改变负荷容量,达到模拟风电的高渗透和低渗透以及轻负荷和重负荷等情况,以实现所提模型在不同目标和系统不同运行状态下的经济调度情况。经济调度时间为一天,调度时刻为 1 h。系统网损采用 B 系数法进行计算,具体参数如文献[23]所示。发电机的发电约束以及环境污染排放参数如文献[18]、文献[24]和文献[25]所示。设置火电机组的爬坡速率为 30 MW/h,风电场的发电成本为 300 元/MW,弃风惩罚为 150 元/MW。为验证算法的有效性和准确性,在 Matlab R2021b 上进行仿真分析,并与多目标粒子群优化算法(multi-objective particle swarm optimization, MOPSO)^[26]、非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm, NSGA)^[27]、多目标蚁狮优化算法(multi-objective ant lion optimization algorithm, MOALO)^[28]、多目标蜻蜓算法(multi-objective dragonfly algorithm, MODA)^[29]、多目标灰狼优化算法(multi-objective grey wolf optimization, MOGWO)^[30]、多目标随机绘画优化算法(multi-objective stochastic paint optimizer, MOSPO)^[31]、多目标非洲秃鹫优化

算法(multi-objective African vultures optimization algorithm, MOAVOA)^[32]进行对比分析,进一步探究所提算法的优越性。设置所有算法的最大迭代次数为 100 次、初始解个数为 100 个、各算法独立运行 10 次,最终结果取平均值。

3.1 不同运行目标

为验证所提算法的有效性,考虑电力系统在两种不同多目标情况下的经济调度情况。情况 1 考虑发电成本和污染物,取 $d_1 = 0.45$, $d_2 = 0.45$, $d_3 = 0.1$ 。情况 2 考虑发电成本和系统网损,取 $d_1 = 0.45$, $d_2 = 0.1$, $d_3 = 0.45$ 。两种情况的运行结果如表 1 所示。火电机组和风电场在 24 h 各时刻的出力如图 4 所示。

从运行结果可知,所有算法都可以满足功率平衡要求,且在相同的负荷情况下,从所有算法的平均值来看,情况 1 的发电成本比情况 2 减少 16 580.08 元,污染物排放减少 3.7192 t,系统网损增加 54.3630 MW,选择情况 1 可以获得更低的发电成本和污染物排放,而选择情况 2 可以获得更低的系统网损。相较其余对比算法,MOAOS 在两种情况下具有最好的经济调度结果。并且从图 4 中可以看出,24 h 内的功率平衡均满足要求,机组容量未出现越限情况。

上述两种不同运行目标的结果,采用不同权重时的得分情况如表 2 所示。

表 1 不同运行目标下的经济调度结果

Table 1 Economic dispatch results under different operational objectives

| 运行目标 | 算法 | 总发电费用/元 | 总污染物排放/t | 总损耗/MW | $\Sigma(\Sigma G_i - P_D - P_{loss})/MW$ | 评价得分 |
|-------------------|--------------|-------------------|---------------|-----------------|--|--------------|
| 考虑发电成本和 污染气体排放 | MOPSO | 642 373.97 | 4.8142 | 223.8525 | 2.27×10^{-12} | 0.537 |
| | NSGA | 643 522.30 | 4.5661 | 229.2995 | 4.29×10^{-4} | 0.450 |
| | MOALO | 642 469.37 | 4.7556 | 222.3902 | 1.47×10^{-12} | 0.624 |
| | MODA | 642 387.52 | 4.7866 | 223.9547 | -5.68×10^{-12} | 0.579 |
| | MOGWO | 642 370.58 | 4.8205 | 223.4350 | 1.59×10^{-12} | 0.533 |
| | MOSPO | 642 365.29 | 4.8114 | 224.1944 | 2.07×10^{-12} | 0.540 |
| | MOAVOA | 642 424.61 | 4.7518 | 225.7623 | 1.90×10^{-12} | 0.600 |
| | MOAOS | 642 498.77 | 4.7003 | 225.9436 | 2.44×10^{-12} | 0.659 |
| | 平均值 | 642 551.55 | 4.7508 | 224.8540 | — | — |
| 考虑发电成本和 系统损耗 | MOPSO | 657 797.48 | 8.5135 | 170.5107 | 3.50×10^{-4} | 0.584 |
| | NSGA | 671 868.04 | 8.3693 | 168.5883 | 1.66×10^{-3} | 0.546 |
| | MOALO | 658 141.33 | 8.4333 | 170.6643 | -1.62×10^{-3} | 0.595 |
| | MODA | 653 927.25 | 8.4559 | 172.1234 | -5.32×10^{-4} | 0.504 |
| | MOGWO | 655 285.09 | 8.3606 | 171.4423 | -1.81×10^{-5} | 0.603 |
| | MOSPO | 655 124.36 | 8.5679 | 171.3866 | 5.43×10^{-4} | 0.514 |
| | MOAVOA | 658 070.69 | 8.5396 | 170.3081 | -6.80×10^{-4} | 0.591 |
| | MOAOS | 662 838.77 | 8.5201 | 168.9041 | 6.55×10^{-4} | 0.659 |
| | 平均值 | 659 131.63 | 8.4700 | 170.4910 | — | — |

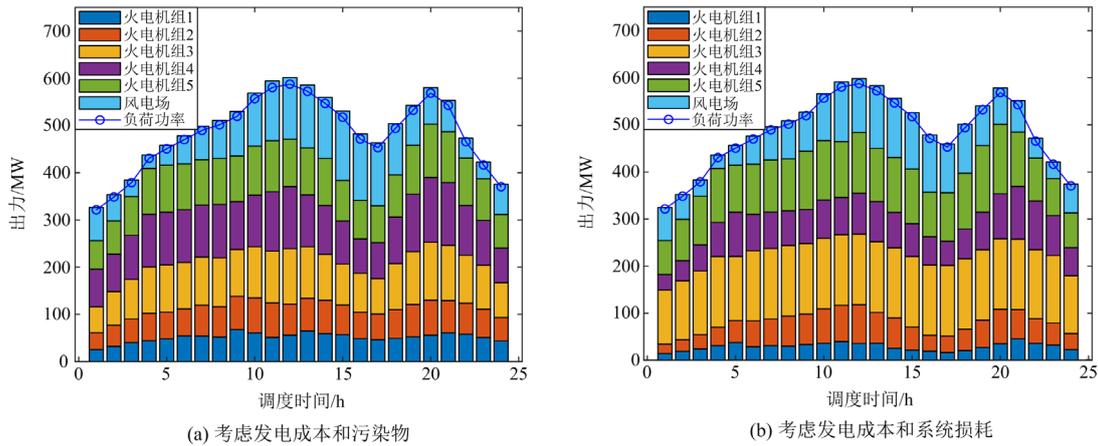


图 4 不同运行目标下的系统机组出力情况

Fig. 4 System unit output under different operating objectives

表 2 采取不同权重时的评分结果

Table 2 Scoring results by taking different weights

| 情况 1 | 算法 | $d_1 = 0.425, d_2 = 0.425,$ $d_3 = 0.15$ | $d_1 = 0.45, d_2 = 0.45,$ $d_3 = 0.1$ | $d_1 = 0.475, d_2 = 0.475,$ $d_3 = 0.05$ | $d_1 = 0.5, d_2 = 0.5,$ $d_3 = 0$ | 平均值 |
|--------------|--------------|---|--|---|--------------------------------------|--------------|
| 考虑发电成本和污染物排放 | MOPSO | 0.551 | 0.537 | 0.523 | 0.509 | 0.530 |
| | NSGA | 0.425 | 0.450 | 0.475 | 0.500 | 0.463 |
| | MOALO | 0.645 | 0.624 | 0.603 | 0.583 | 0.614 |
| | MODA | 0.590 | 0.579 | 0.568 | 0.557 | 0.574 |
| | MOGWO | 0.550 | 0.533 | 0.515 | 0.498 | 0.524 |
| | MOSPO | 0.551 | 0.540 | 0.529 | 0.518 | 0.534 |
| | MOAVOA | 0.595 | 0.600 | 0.605 | 0.609 | 0.602 |
| | MOAOS | 0.650 | 0.659 | 0.669 | 0.679 | 0.664 |
| 情况 2 | 算法 | $d_1 = 0.425, d_2 = 0.15,$ $d_3 = 0.425$ | $d_1 = 0.45, d_2 = 0.45,$ $d_3 = 0.1$ | $d_1 = 0.475, d_2 = 0.475,$ $d_3 = 0.05$ | $d_1 = 0.5, d_2 = 0.5,$ $d_3 = 0$ | 平均值 |
| 考虑发电成本和系统损耗 | MOPSO | 0.567 | 0.584 | 0.602 | 0.620 | 0.593 |
| | NSGA | 0.569 | 0.546 | 0.523 | 0.500 | 0.534 |
| | MOALO | 0.598 | 0.595 | 0.592 | 0.589 | 0.594 |
| | MODA | 0.506 | 0.504 | 0.502 | 0.500 | 0.503 |
| | MOGWO | 0.625 | 0.603 | 0.581 | 0.558 | 0.592 |
| | MOSPO | 0.485 | 0.514 | 0.542 | 0.571 | 0.528 |
| | MOAVOA | 0.566 | 0.591 | 0.616 | 0.641 | 0.604 |
| | MOAOS | 0.636 | 0.659 | 0.683 | 0.707 | 0.671 |

从表 2 计算结果可知, 采用不同权重时所提算法仍然具有经济调度优势和最好的运算结果。所提算法相较其余对比算法具有更好的适应性。

3.2 不同运行状态

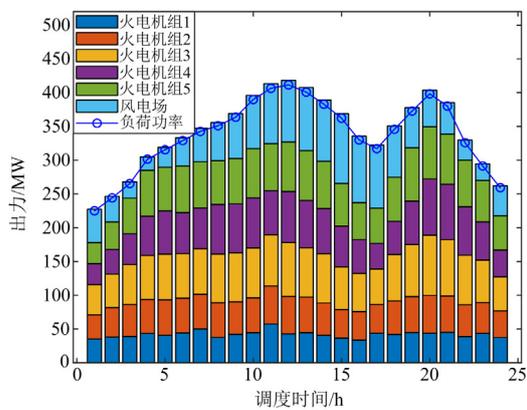
随着“双碳”目标的提出, 面临着传统电力系统向新型电力系统的转型, 减少碳排放成为重要的考虑因素。为更好地挖掘系统减少污染物排放的能力, 考虑电力系统发电成本和环境的前提下, 模拟不同负荷和不同风电场容量占比情况下经济调度的结果, 对风电场出力乘系数 k_1 , 负荷功率乘系数 k_2 。考虑不同风电和负荷的运行情况如表 3 所示, 不同运行状态下的系统机组出力情况如图 5 所示。

从表 3 中所有算法的平均值可知, 在轻负荷情况下, 风电渗透率高时比风电渗透率低时的发电成本减少 40 634.52 元, 污染物排放减少 0.0812 t, 网损增加 44.4867 MW。在重负荷情况下, 风电渗透率高时比风电渗透率低时的发电成本减少 34 123.34 元, 污染物排放减少 1.13 t, 网损增加 24.41 MW。电力系统中风电场的投入, 可以降低系统的发电成本和污染物排放, 但会增加系统的网损。并且随着系统的负荷增加, 发电成本、污染物排放以及系统网损都将随之增加。从图 5 可以看出, 不同运行状态下的机组均能满足发电限制, 且各时刻功率满足平衡条件。

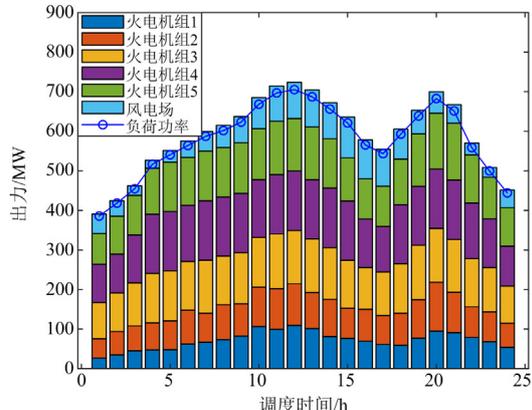
表 3 不同运行状态下的经济调度结果

Table 3 Economic dispatch results under different operating states

| 运行状态 | 算法 | 总发电费用/元 | 总污染排放/t | 总损耗/MW | $\Sigma(\Sigma G_i - P_D - P_{loss})/MW$ | 评价得分 |
|--|--------------|---------------------|---------------|-----------------|---|--------------|
| 低风电渗透轻负荷 ($k_1 = 0.7, k_2 = 0.7$) | MOPSO | 4 204 479.05 | 3.7236 | 112.9865 | 7.10×10^{-14} | 0.669 |
| | NSGA | 4 208 894.85 | 3.6468 | 113.9003 | 1.27×10^{-13} | 0.487 |
| | MOALO | 4 204 717.08 | 3.6982 | 112.0064 | -1.70×10^{-13} | 0.772 |
| | MODA | 4 204 312.18 | 3.7695 | 115.0071 | 1.42×10^{-12} | 0.450 |
| | MOGWO | 4 204 486.31 | 3.7109 | 112.6592 | -1.63×10^{-12} | 0.726 |
| | MOSPO | 4 205 426.76 | 3.7284 | 113.1513 | 1.56×10^{-13} | 0.553 |
| | MOAVOA | 4 204 552.39 | 3.6901 | 113.6202 | 3.41×10^{-13} | 0.764 |
| | MOAOS | 4 204 800.96 | 3.6773 | 112.3758 | 2.27×10^{-13} | 0.828 |
| | 平均值 | 4 205208.70 | 3.7056 | 113.2133 | — | — |
| 低风电渗透重负荷 ($k_1 = 0.7, k_2 = 1.2$) | MOPSO | 3 061 340.38 | 8.1968 | 296.1753 | -5.11×10^{-12} | 0.549 |
| | NSGA | 3 062 307.17 | 6.8343 | 317.5440 | -5.11×10^{-13} | 0.450 |
| | MOALO | 3 061 440.85 | 7.8694 | 296.5641 | -1.64×10^{-12} | 0.609 |
| | MODA | 3 061 370.23 | 8.0226 | 296.9198 | -2.84×10^{-13} | 0.590 |
| | MOGWO | 3 061 383.23 | 7.9710 | 296.0368 | -8.52×10^{-12} | 0.605 |
| | MOSPO | 3 061 389.70 | 7.9754 | 297.2693 | -2.33×10^{-12} | 0.594 |
| | MOAVOA | 3 061 427.44 | 7.8301 | 297.6758 | -3.06×10^{-12} | 0.623 |
| | MOAOS | 3 061 514.63 | 7.5442 | 302.0321 | -4.66×10^{-12} | 0.657 |
| | 平均值 | 3 061 521.70 | 7.7805 | 300.0271 | — | — |
| 高风电渗透轻负荷 ($k_1 = 1.2, k_2 = 0.7$) | MOPSO | 4 164 216.77 | 3.6306 | 156.9251 | -2.21×10^{-12} | 0.379 |
| | NSGA | 4 166 388.98 | 3.5910 | 157.7320 | 7.39×10^{-5} | 0.583 |
| | MOALO | 4 165 224.78 | 3.6255 | 157.1326 | -3.12×10^{-13} | 0.376 |
| | MODA | 4 157 018.68 | 3.6503 | 160.1777 | 7.05×10^{-4} | 0.450 |
| | MOGWO | 4 168 856.19 | 3.6341 | 159.6147 | -6.86×10^{-2} | 0.132 |
| | MOSPO | 4 163 566.74 | 3.6397 | 156.5172 | -5.68×10^{-14} | 0.341 |
| | MOAVOA | 4 168 621.87 | 3.6169 | 159.4929 | -1.84×10^{-12} | 0.273 |
| | MOAOS | 4 162 699.41 | 3.6072 | 154.0077 | -8.04×10^{-6} | 0.661 |
| | 平均值 | 4 164 574.18 | 3.6244 | 157.7000 | — | — |
| 高风电渗透重负荷 ($k_1 = 1.2, k_2 = 1.2$) | MOPSO | 3 027 247.27 | 6.8997 | 320.5691 | -2.04×10^{-12} | 0.564 |
| | NSGA | 3 028 081.04 | 5.9512 | 338.1176 | -2.79×10^{-12} | 0.450 |
| | MOALO | 3 027 338.69 | 6.6406 | 322.2365 | -1.02×10^{-12} | 0.620 |
| | MODA | 3 027 269.31 | 6.9872 | 321.6461 | -2.50×10^{-12} | 0.508 |
| | MOGWO | 3 027 297.73 | 6.7669 | 322.0803 | -1.81×10^{-12} | 0.587 |
| | MOSPO | 3 027 202.24 | 6.9605 | 320.3541 | -3.01×10^{-12} | 0.562 |
| | MOAVOA | 3 027 356.39 | 6.6100 | 323.7172 | -1.30×10^{-12} | 0.616 |
| | MOAOS | 3 027 394.23 | 6.3914 | 326.7881 | -2.55×10^{-12} | 0.674 |
| | 平均值 | 3 027 398.36 | 6.6509 | 324.4386 | — | — |



(a) 低风电渗透轻负荷



(b) 低风电渗透重负荷

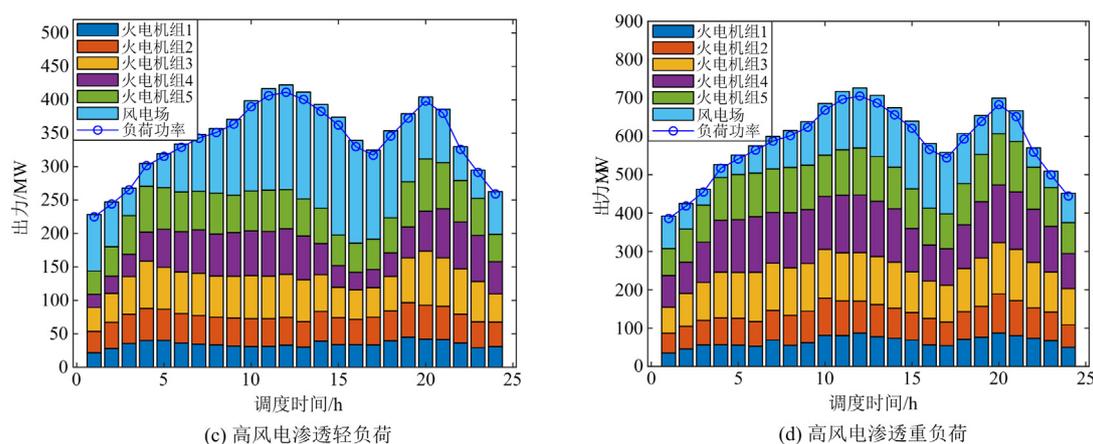


图5 不同运行状态下的系统机组出力情况

Fig. 5 System unit output under different operating conditions

上述4种情况中,根据机组前后两次调节状态,分析火电机组在各个时刻的剩余可调功率。在低风电渗透轻负荷运行状态下,24时刻中火电机组的最小剩余可调容量近17 MW,最大剩余可调容量近93 MW,平均剩余可调容量近56 MW。在低风电渗透重负荷运行状态下,24时刻中火电机组的最小剩余可调容量近58 MW,最大剩余可调容量近167 MW,平均剩余可调容量近116 MW。在高风电渗透轻负荷运行状态下,24时刻中火电机组的最小剩余可调容量近6 MW,最大剩余可调容量近71 MW,平均剩余可调容量近47 MW。在高风电渗透重负荷运行状态下,24时刻中火电机组的最小剩余可调容量近36 MW,最大剩余可调容量近160 MW,平均剩余可调容量近100 MW。从火电机组剩余可调容量可知,火电机组仍具有一定调节能力,经济调度结果符合机组功率界限范围。

结果表明,MOAOS在不同运行目标下和不同运行状态下的综合评价得分都是最高的,尤其是在高风电渗透和重负荷运行状态下展现出了较为优越的性能,其评分为0.674,分别比NSGA、MOPSO、MOGWO、MOAVOA高49.78%、19.50%、14.82%、9.42%。

4 结论

本文建立了风-火多随机变量的经济调度模型。该模型考虑了系统的网损、碳排放以及发电成本,并通过调节容量参数的方式实现所提模型在不同目标和系统不同运行状态下的经济调度情况。该模型采用了MOAOS进行求解。本研究贡献如下:

1) 充分考虑到了新能源渗透率、风能波动性的影响,模拟了低风电渗透和轻负荷、低风电渗透和

重负荷、高风电渗透和轻负荷、高风电渗透和重负荷4种运行状态下的经济调度;

2) 采取权重的方式计算最终得分,解决了在进行多目标经济调度时,每个目标很难都取到最优值的难题,有效避免了评价的片面性;

3) 基于MOAOS的风电场集群最优经济调度可以避免算法陷入局部最优,提高系统整体运行效率和实用性;

4) 算例研究表明,MOAOS在不同运行目标下和不同运行状态下的综合评价得分都是最高的,尤其是在高风电渗透和重负荷运行状态下展现出了较为优越的性能,其评分为0.674,分别比NSGA、MOPSO、MOGWO、MOAVOA高49.78%、19.50%、14.82%、9.42%。

本研究可以为可再生能源发电系统的优化调度及经济组合提供较为科学合理的参考,且模型具有较强的普适性,在将来的研究工作中可以根据实际情况很方便地将光、水、储等加入到模型中。

参考文献

- [1] 陈峰, 余轶, 徐敬友, 等. 基于Bayes-LSTM网络的风电出力预测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 170-178.
CHEN Feng, YU Yi, XU Jingyou, et al. Prediction method of wind power output based on a Bayes-LSTM network[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 170-178.
- [2] 王玉洁, 谭忠富, 鞠立伟, 等. 风-光-储联合参与绿电交易下多主体效益分配模型[J]. 电力建设, 2023, 44(5): 134-140.
WANG Yujie, TAN Zhongfu, JU Liwei, et al. Multi-subject benefit distribution model under the union participation of wind-solar-storage in green power transactions[J]. Electric

- Power Construction, 2023, 44(5): 134-140.
- [3] 谈竹奎, 文贤旭, 杨涛, 等. 面向新型电力系统的双馈风力发电机并网控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(3): 181-187.
TAN Zhukui, WEN Xiankui, YANG Tao, et al. A grid-connected control strategy for doubly-fed wind turbines for new power systems[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(3): 181-187.
- [4] 齐金山, 姚良忠, 廖思阳, 等. 高比例新能源电力系统静态电压稳定裕度在线概率评估[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 47-57.
QI Jinshan, YAO Liangzhong, LIAO Siyang, et al. Online probabilistic assessment of static voltage stability margin for power systems with a high proportion of renewable energy[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 47-57.
- [5] 和萍, 宫智杰, 靳浩然, 等. 高比例可再生能源电力系统调峰问题综述[J]. 电力建设, 2022, 43(11): 108-121.
HE Ping, GONG Zhijie, JIN Haoran, et al. Review of peak-shaving problem of electric power system with high proportion of renewable energy[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(11): 108-121.
- [6] 黄国栋, 李伟刚, 李振斌. 大规模风电接入的电网发电调度研究综述[J]. 电测与仪表, 2015, 52(9): 1-5, 18.
HUANG Guodong, LI Weigang, LI Zhenbin. A review on generation dispatching of power system with large-scale wind power[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(9): 1-5, 18.
- [7] 唐建林, 余涛, 张孝顺, 等. 基于多搜索器优化算法的含可再生能源协同优化调度[J]. 控制理论与应用, 2020, 37(3): 492-504.
TANG Jianlin, YU Tao, ZHANG Xiaoshun, et al. Collaborative optimization scheduling with renewable energy based on multi-searcher optimization algorithm[J]. Control Theory & Applications, 2020, 37(3): 492-504.
- [8] ACHARYA S, SIVARAJAN G, KUMAR D V, et al. Modeling combined economic emission dispatch for renewable energy system via Levy-based glowworm swarm optimization[J]. Kybernetes, 2022.
- [9] 孙凯, 张新燕, 周登钰, 等. 含大规模新能源的现代电力系统动态经济调度研究[J]. 可再生能源, 2018, 36(5): 771-777.
SUN Kai, ZHANG Xinyan, ZHOU Dengyu, et al. The research on dynamic economic dispatch of modern power system containing large scale new energy sources[J]. Renewable Energy Resources, 2018, 36(5): 771-777.
- [10] LIU Zhifeng, LI Lingling, LIU Yuwei, et al. Dynamic economic emission dispatch considering renewable energy generation: a novel multi-objective optimization approach[J]. Energy, 2021, 235: 1-19.
- [11] 郭小璇, 龚仁喜, 鲍海波, 等. 含新能源电力系统机会约束经济调度的二阶锥规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 85-91.
GUO Xiaoxuan, GONG Renxi, BAO Haibo, et al. Second-order cone programming method of chance constrained economic dispatch considering renewable energy sources[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 85-91.
- [12] 甘伟, 艾小猛, 方家琨, 等. 风-火-水-储-气联合优化调度策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(增刊 1): 11-20.
GAN Wei, AI Xiaomeng, FANG Jiakun, et al. Coordinated optimal operation of the wind, coal, hydro, gas units with energy storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(S1): 11-20.
- [13] 梁子鹏, 陈皓勇, 雷佳, 等. 考虑风电不确定度的风-火-水-气-核-抽水蓄能多源协同旋转备用优化[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2111-2119, 2121-2123.
LIANG Zipeng, CHEN Haoyong, LEI Jia, et al. A multi-source coordinated spinning reserve model considering wind power uncertainty[J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2111-2119, 2121-2123.
- [14] DEY S K, DASH D P, BASU M. Application of NSGA-II for environmental constraint economic dispatch of thermal-wind-solar power system[J]. Renewable Energy Focus, 2022, 43: 239-245.
- [15] 杜宇龙, 徐天奇, 李琰, 等. 基于自适应扩散高斯核密度风电预测误差估计的风火联合优化调度研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(21): 11-21.
DU Yulong, XU Tianqi, LI Yan, et al. Wind-fire joint optimal dispatching based on adaptive diffusion Gaussian kernel density wind farm output power forecast error estimation[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(21): 11-21.
- [16] 王庆, 李玉琛, 蒙飞, 等. 混沌正余弦算法在含风能电力系统经济排放调度中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(24): 172-177.
WANG Qing, LI Yuchen, MENG Fei, et al. Application of an improved chaotic sine cosine algorithm in the economic emission scheduling of a power system with wind energy[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(24): 172-177.
- [17] AZIZI M, TALATAHARI S, KHODADADI N, et al. Multi-objective atomic orbital search (MOAOS) for global and engineering design optimization[J]. IEEE Access, 2022, 10: 67727-67746.
- [18] 张子泳, 仇梦林, 李莎. 基于多目标粒子群算法的电力系统环境经济调度研究[J]. 电力系统保护与控制,

- 2017, 45(10): 1-10.
ZHANG Ziyong, ZHANG Menglin, LI Sha. Environmental/economic power dispatch based on multi-objective particle swarm constraint optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 1-10.
- [19] 张磊, 向紫藤, 余朋军, 等. 基于绿色证书交易机制的含风电场电力系统动态环境经济调度[J]. 智慧电力, 2021, 49(10): 75-82.
ZHANG Lei, XIANG Ziteng, YU Pengjun, et al. Dynamic environmental economic dispatch of power system with wind farm based on green certificate transaction mechanisms[J]. Smart Power, 2021, 49(10): 75-82.
- [20] 陈道君, 龚庆武, 乔卉, 等. 采用改进生物地理学算法的风电并网电力系统多目标发电调度[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(31): 150-158, 231.
CHEN Daojun, GONG Qingwu, QIAO Hui, et al. Multi-objective generation dispatching for wind power integrated system adopting improved biogeography-based optimization algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(31): 150-158, 231.
- [21] AZIZI M. Atomic orbital search: a novel meta-heuristic algorithm[J]. Applied Mathematical Modelling, 2021, 93: 657-683.
- [22] KHAN M K, ZAFAR M H, MANSOOR M, et al. Green energy extraction for sustainable development: a novel MPPT technique for hybrid PV-TEG system[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022, 53: 1-20.
- [23] 徐丽青, 吴亚丽. 求解环境经济调度问题的多目标差分粒子群优化算法[J]. 西安理工大学学报, 2011, 27(1): 62-68.
XU Liqing, WU Yali. Multiobjective particle swarm optimization based on differential evolution for environmental/economic dispatch problem[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2011, 27(1): 62-68.
- [24] 张坤亚, 马平, 赵世文, 等. 含风电场的电力系统环保经济调度[J]. 电气技术, 2017(3): 25-29, 46.
ZHANG Kunya, MA Ping, ZHAO Shiwen, et al. Environmental economic dispatch of electric power system with wind farms[J]. Electrical Engineering, 2017(3): 25-29, 46.
- [25] 张海峰, 高峰, 吴江, 等. 含风电的电力系统动态经济调度模型[J]. 电网技术, 2013, 37(5): 1298-1303.
ZHANG Haifeng, GAO Feng, WU Jiang, et al. A dynamic economic dispatching model for power grid containing wind power generation system[J]. Power System Technology, 2013, 37(5): 1298-1303.
- [26] COELLO COELLO C A, Lechuga M S. MOPSO: a proposal for multiple objective particle swarm optimization[C]// Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation, May 12-17, 2002, Honolulu, HI, USA: 1051-1056.
- [27] DENG Wu, ZHANG Xiaoxiao, ZHOU Yongquan, et al. An enhanced fast non-dominated solution sorting genetic algorithm for multi-objective problems[J]. Information Sciences, 2022, 585: 441-453.
- [28] MIRJALILI S, JANGIR P, SAREMI S. Multi-objective ant lion optimizer: a multi-objective optimization algorithm for solving engineering problems[J]. Applied Intelligence, 2017, 46: 79-95.
- [29] MIRJALILI S. Dragonfly algorithm: a new meta-heuristic optimization technique for solving single-objective, discrete, and multi-objective problems[J]. Neural Computing and Applications, 2016, 27: 1053-1073.
- [30] MIRJALILI S, SAREMI S, MIRJALILI S M, et al. Multi-objective grey wolf optimizer: a novel algorithm for multi-criterion optimization[J]. Expert Systems with Applications, 2016, 47: 106-119.
- [31] KHODADADI N, ABUALIGAH L, MIRJALILI S. Multi-objective stochastic paint optimizer (MOSPO)[J]. Neural Computing and Applications, 2022, 34(20): 18035-18058.
- [32] KHODADADI N, SOLEIMANIAN GHAREHCHOPOGH F, MIRJALILI S. MOAVOA: a new multi-objective artificial vultures optimization algorithm[J]. Neural Computing and Applications, 2022, 34(23): 20791-20829.

收稿日期: 2023-07-21; 修回日期: 2023-08-22

作者简介:

程先龙(1982—), 男, 本科, 工程师, 研究方向为电网调度运行; E-mail: 279782729@qq.com

王川(1990—), 男, 本科, 工程师, 研究方向为电网调度运行; E-mail: 751055355@qq.com

杨博(1988—), 男, 通信作者, 博士, 教授、博士生导师, 研究方向为基于人工智能的新能源系统优化与控制。E-mail: yangbo_ac@outlook.com

(编辑 魏小丽)