

考虑源荷不确定性的微电网最优经济运行

李佳讯¹, 张寿明^{1*}, 杨 森²

(1. 昆明理工大学 信息工程与自动化学院, 云南 昆明 650500;

2. 滇西应用技术大学 测绘与信息工程学院, 云南 大理 671006)

The Optimal Economic Operation of a Microgrid Considering Source-Load Uncertainty

LI Jiaxun¹, ZHANG Shouming^{1*}, YANG Sen²

(1. Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology,
Kunming 650500, China;

2. Department of Computer Science and Technology, West Yunnan University of Applied Sciences,
Dali 671006, China)

Abstract: [Objective] With the continuous development and improvement of microgrid technology, the use of renewable energy is increasingly valued. The impact of source-load uncertainty on microgrid security as well as economic operation cannot be ignored, and in order to solve the problem of optimal economic operation of microgrid, a hybrid Harris Hawk optimization (HHHO) algorithm is proposed. [Methods] Firstly, an optimal microgrid scheduling model considering source-load uncertainty was developed. Secondly, a HHHO algorithm combining elite strategy and differential learning mechanism was proposed. The elite strategy improved the convergence speed of the algorithm by retaining the elite individuals in the population. The differential learning mechanism optimized the accuracy of the algorithm's search by enhancing the dissemination of valid information. Then, a hybrid scene reduction method based on Latin hypercube sampling-probabilistic distance was proposed, and the reduced equivalent scene was used as the basis for the economic operation of the microgrid. Finally, the superiority of the proposed HHHO algorithm was verified by test functions and scene simulations. [Results] The test function experimental results showed that the proposed HHHO algorithm had high solution accuracy and fast convergence speed. Simulation results in scenarios such as wind and photovoltaic fluctuations showed that the HHHO algorithm was highly superior and significantly reduced the overall operating cost of the microgrid. [Conclusion] The proposed HHHO algorithm enables optimal economic operation of

microgrids and provides theoretical support for long-term economic operation of microgrid.

Key words: microgrid; source-load uncertainty; optimal economic operation; hybrid Harris Hawk optimization algorithm

摘 要: 【目的】随着微电网技术的不断发展与完善,可再生能源的利用愈发被重视。源荷不确定性对微电网安全以及经济运行造成的影响不容忽视,为了解决微电网最优经济运行问题,提出了一种混合哈里斯鹰优化(HHHO)算法。【方法】首先,建立了一种考虑源荷不确定性的最优微电网调度模型。其次,提出了一种结合精英策略和差异学习机制的HHHO算法。精英策略通过保留种群中的精英个体,提高了算法的收敛速度;差异学习机制通过增强有效信息的传播,优化了算法搜索的精度。然后,提出了一种基于拉丁超立方采样-概率距离的混合场景削减方法,将削减后的等效场景作为微电网经济运行的依据。最后,通过测试函数和场景仿真,验证了所提HHHO算法的优越性。【结果】测试函数试验结果表明所提HHHO算法具有较高的求解精度和较快的收敛速度。在风能和光伏波动等场景下的仿真结果表明,HHHO算法显著减少了微电网的总体运行成本,具有一定的优越性。【结论】所提HHHO算法可实现微电网的最优经济运行,为微电网的长期经济运行提供了理论支持。

关键词: 微电网;源荷不确定性;最优经济运行;混合哈里斯鹰优化算法

0 引言

微电网由分布式能源、电力电子设备和负载

基金项目: 国家自然科学基金(62263018)

National Natural Science Foundation of China (62263018)

组成,是一种新型的发电和配电系统,为微型电力系统提供了新的供电形式。太阳能、风能等可再生能源建立的微电网作为一种新模式,逐渐受到人们的重视^[1-2]。与此同时,能源结构的转变是能源革命的关键之一,因为需要控制电力成本、取代老化的基础设施、提高电力系统的灵活性和可靠性以及减少二氧化碳排放^[3],可再生能源逐步成为发电的主要来源。为了满足低碳化和可持续发展的要求,文献[4]提出了一种微电网集群能源共享模型,为微电网在源荷不确定情况下长期运行提供了思路。在不可预测的情景下对微电网进行经济优化,已经成为当前研究的焦点之一。本文针对微电网在源荷不确定条件下的经济优化运行展开研究。

文献[5]提出了一种领导者哈里斯鹰优化(Harris Hawk Optimization, HHO)算法,该算法通过突变选择和自适应概率提高了算法的搜索能力。文献[6]提出了一种全局引导的人工蜂群(Artificial Bee Colony, ABC)算法,并将该算法用于具有远程电池存储的微电网调度,以获得更好的调度结果。文献[7]研究了考虑源荷不确定性的多个微电网的两阶段鲁棒优化调度策略,以及微电网之间的互补和竞争交易策略。文献[8]考虑到季节能量不平衡的特点,建立了电热氢耦合模型。源荷不确定性是一个重大挑战,不仅影响微电网的经济成本,在严重情况下还对微电网的安全运行构成威胁。

尽管目前众多学者对微电网的最优调度进行了广泛的研究,但随着风能和光伏等可再生能源在微电网中的普及率的日益提高,能源固有的随机性和间歇性导致微电网稳定以及经济运行面临重大挑战。现有研究多将不确定性作为一种参数扰动来处理,而没有分析其对优化结果的具体影响;缺乏关于负荷变化性和可再生能源输出不确定性的耦合效应对微电网经济运行的潜在影响的综合分析;关于较大波动对微电网长期经济运行的影响的分析不够严格。

本文建立了一种同时考虑源荷不确定性的最优微电网调度模型,提出了一种混合哈里斯鹰优化(Hybrid HHO, HHHO)算法,并构建了一个基于场景分析的不确定性场景集,以提高模型对实际运行条件的适应性。仿真结果表明,所提

HHHO算法可以显著减少微电网系统的总体成本,为微电网的长期经济运行提供了理论支持。

1 问题描述

本文提出了一种微电网的优化模型,包括源荷不确定性优化和供电设备故障运行优化。模型解决了源荷不稳定的问题,并且模型将问题转换为稳定的场景,优化了每个微源的输出,以实现微电网的最优经济运行。

1.1 微电网模型

蓄电池(Battery Storage, BS)能够满足微电网的功率平衡关系,减轻外部环境变化对功率波动的影响。充放电过程中,BS在 t 时刻的荷电状态(State of Charge, SOC)如式(1)^[9]所示:

$$SOC(t) = SOC(t-1) + [P_{BS}(t) \cdot \eta_{BS} \cdot \Delta t] / E_{BS} \quad (1)$$

式中: $SOC(t)$ 、 $SOC(t-1)$ 分别为 t 时刻和 $t-1$ 时刻BS的SOC; Δt 为BS的单位运行时间; P_{BS} 、 η_{BS} 分别为BS充放电功率、充放电效率; E_{BS} 为BS的额定容量,为552 kW。

微型燃气轮机(Microturbine, MT)的成本主要由污染造成的经济损失和燃料成本^[10]。成本表达式为

$$C(P_{MT}) = (\varphi / LHV) \times [(P_{MT} \Delta t) / \eta_{MT}] + \sum_{i=1}^M \gamma_{MT}^i \beta_{MT}^i P_{MT} \quad (2)$$

式中: P_{MT} 为MT的输出功率; Δt 为MT的单位运行时间; η_{MT} 为MT的运行效率,本文设置为80%; φ 为天然气价格,本文为2.05元/m³;LHV为燃气的低热值; M 为污染物种类,本文考虑了二氧化碳、二氧化硫和氮氧化物3种污染物; γ_{MT}^i 为MT每单位发电量排放的第 i 种污染物质; β_{MT}^i 为MT发电时产生每单位第 i 种污染物的经济损失。

柴油发电机(Diesel Generator, DG)的成本主要由污染造成的经济损失和燃料成本^[11]。成本表达式为

$$C(P_{DG}) = a_0 P_{DG}^2 + a_1 P_{DG} + a_2 + \sum_{i=1}^M \gamma_{DG}^i \beta_{DG}^i P_{DG} \quad (3)$$

式中: P_{DG} 为DG的输出功率; a_0 、 a_1 和 a_2 为成本系数; γ_{DG}^i 为DG每单位发电量所排放的第 i 种污染物质; β_{DG}^i 为DG发电时产生每单位第 i 种污染

物的经济损失。

光伏 (Photovoltaic, PV) 阵列由一系列 PV 电池组成, 其输出功率为

$$P_{PV}(t) = \eta_{PV} \cdot I_{PV}(t) \cdot A_{PV} \quad (4)$$

式中: P_{PV} 、 η_{PV} 分别为 PV 阵列的输出功率、效率; $I_{PV}(t)$ 为 t 时的太阳辐射强度; A_{PV} 为 PV 电池的面积。

风力涡轮机 (Wind Turbine, WT) 的输出功率取决于盛行的风速和涡轮机本身的输出特性, 表达式为^[12-13]

$$P_{WT}(t) = \begin{cases} 0, & v_t < v_c \cup v_t > v_f \\ P_r \times \left(\frac{v_t - v_c}{v_r - v_c} \right)^3, & v_c \leq v_t < v_r \\ P_r, & v_r \leq v_t \leq v_f \end{cases} \quad (5)$$

式中: $P_{WT}(t)$ 为 t 时刻 WT 的输出功率; v_t 为 t 时刻的实际风速; v_c 、 v_f 为 t 时刻的进口风速、截止风速; v_r 为额定风速; P_r 为 WT 额定功率。

1.2 目标函数

优化模型的目标是使微电网的运行成本最小。以并网微电网为例, 其涉及 2 类可再生能源 PV、WT 和 3 个可控微源 BS、MT 和 DG, 目标函数如式 (6) 所示:

$$\min F_c = \sum_{t=1}^{24} \sum_{j=1}^2 C(P_j) + \sum_{t=1}^{24} \sum_{k=1}^3 C(P_k) + \sum_{t=1}^{24} C(P_{BS}) + \sum_{t=1}^{24} C(P_L) \quad (6)$$

式中: F_c 为系统的总运行成本; P_j 为第 j 类可再生能源的实际输出功率; P_k 为第 k 个可控微源的实际输出功率; P_L 为与主电网的交互功率^[14]; $C(P_L)$ 为与电价相关的函数; $C(P_j)$ 、 $C(P_k)$ 为对应的发电成本。

1.3 约束条件

功率平衡约束条件为

$$P_{load} = \sum_{j=1}^2 P_j + \sum_{k=1}^3 P_k + P_{BS} + P_L \quad (7)$$

式中: P_{load} 为需满足的负荷需求。

可控微源功率约束条件为

$$P_k^{\min} \leq P_k \leq P_k^{\max} \quad (8)$$

式中: $P_k^{\max}$ 、 $P_k^{\min}$ 分别为第 k 个可控微源输出功率的上、下限。

电池存储限制条件为

$$SOC^l \leq SOC \leq SOC^h \quad (9)$$

$$P_{BS}^{\min} \leq P_{BS} \leq P_{BS}^{\max} \quad (10)$$

式中: $P_{BS}^{\max}$ 、 $P_{BS}^{\min}$ 分别为 BS 输出功率的上、下限; SOC^h 、 SOC^l 分别为 BS 的 SOC 上、下限^[15]。

微电网到主电网的功率约束条件为

$$P_L^{\min} \leq P_L \leq P_L^{\max} \quad (11)$$

式中: $P_L^{\max}$ 、 $P_L^{\min}$ 分别为与主电网的交互功率上、下限。

2 HHO 算法

2.1 HHO 算法

在 HHO 算法的初始阶段, 哈里斯鹰从一个指定的位置进行观察, 并采用不同的策略来包围和捕获猎物, 寻找全局最优的个体。在搜索阶段, 采用两种策略来包围和捕获猎物, 如式 (12) 所示:

$$X(t+1) = \begin{cases} [X_p(t) - X_m(t)] - r_3[lb + r_4(ub - lb)], & q < 0.5 \\ X_r(t) - r_1 | X_r(t) - 2r_2 X(t) |, & q \geq 0.5 \end{cases} \quad (12)$$

式中: t 当前迭代次数; $X(t+1)$ 和 $X(t)$ 分别为哈里斯鹰在下次迭代和当前迭代中的位置; $X_r(t)$ 为随机选择的位置; $X_p(t)$ 为猎物的位置, 即当前最佳解的位置; r_1 、 r_2 、 r_3 和 r_4 为 $[0, 1]$ 上的随机数^[16]; q 为策略参数, $q \in [0, 1]$ ^[16]; lb 、 ub 分别为种群的下界、上界; $X_m(t)$ 为种群的平均位置, 其表达式为

$$X_m(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i(t) \quad (13)$$

式中: N 为种群中的个体数。

在搜索和开发之间的过渡阶段, HHO 算法通过计算猎物的飞行能量 E , 来选择合适的捕食策略。 E 的表达式为^[17]

$$E = 2E_0 \left(1 - \frac{t}{T} \right) \quad (14)$$

式中: E_0 为猎物的初始能量, 为 $[-1, 1]$ 上的随机数^[18]; T 为最大迭代次数。

在开发阶段, HHO 算法根据 E 和随机数 $r \in [0, 1]$ 的取值范围, 从四种位置更新策略 (软硬围攻和渐进式快速俯冲围攻) 中进行选择^[19]。

当 $r \geq 0.5$ 且 $|E| \geq 0.5$ 时, 位置更新表达式为

$$X(t+1) = X_p(t) - X(t) - E | JX_p(t) - X(t) | \quad (15)$$

式中: J 为更新步长,为 $[0,2]$ 上的随机数。

当 $r \geq 0.5$ 且 $|E| < 0.5$ 时,位置更新表达式为

$$X(t+1) = X_p(t) - E |X_p(t) - X(t)| \quad (16)$$

当 $r < 0.5$ 且 $|E| \geq 0.5$ 时,位置更新表达式为

$$X(t+1) = X_p(t) - E |JX_p(t) - X(t)| \quad (17)$$

如果式(17)效果不佳,则使用 Lévy 飞行策略,位置更新表达式为

$$Z_1 = X(t+1) + S \times LF(D) \quad (18)$$

式中: LF 为 Lévy 函数; D 为维数; S 为 D 维随机向量元素的值, $S \in [0,1]$ 。Lévy 函数的表达式为^[20]

$$LF(x) = 0.01 \left(\frac{\mu \sigma}{|\vartheta|^{1/\beta}} \right) \quad (19)$$

式中: μ 、 ϑ 为服从正态分布的随机数; β 为1.5; σ 为尺度参数。

当 $r < 0.5$ 且 $|E| < 0.5$ 时,位置更新表达式为

$$X(t+1) = X_p(t) - E |JX_p(t) - X_m(t)| \quad (20)$$

如果式(20)效果不佳,则使用 Lévy 飞行策略,位置更新表达式为

$$Z_2 = X(t+1) + S \times LF(D) \quad (21)$$

2.2 HHHO 算法

2.2.1 差异学习机制

差异学习机制是一种基于差异的更新策略,在优化过程中,通过个体之间的差异来传递和调整信息。这种方法的基本前提是利用当前的最优解和解空间内的其他潜在解之间的差异来指导搜索过程。由于其依赖于解之间的差异,该机制能够规避与过度依赖当前最优解相关的潜在缺陷,从而增强局部收敛过程。该机制帮助算法实现了局部搜索和全局搜索的平衡。当在解空间的给定区域内出现微小的差异时,算法倾向于进行更细致的搜索,从而加速局部收敛;相反,当差异更明显时,算法倾向于进行更广泛的探索,从而提高了识别全局最优解的概率。在搜索阶段,当 $|E| > 1$ 时,本文采用差异学习表达式替换原算法的位置更新表达式。差异学习表达式为^[21]

$$X(t+1) = r[X_p(t) - TF \times X_m(t)] \quad (22)$$

式中: TF 为 $[1,2]$ 上的随机数。

2.2.2 精英策略

精英策略的目的是保留最有效的解,防止在搜索过程中丢失高质量的解。在无精英策略的情况下,该算法可能会花费大量的时间来探索跨越多代的远离最优解的区域,或者可能会由于实施不适当的操作而导致解的质量恶化。虽然精英策略强调保留最优解,但并不影响全局搜索能力。精英策略表达式为^[22]

$$FP = C \times I^{\alpha_1} \quad (23)$$

$$X_e(t) = \text{sortrows}[X(t)] \quad (24)$$

$$m_1 = X_p(t) - X(t) \quad (25)$$

$$m_2 = r \times m_1 \times X_{ek1}(t) - X_{k2}(t) \quad (26)$$

$$X(t+1) =$$

$$\frac{1}{3} [X(t) + X_p(t) + X_{k3}(t)] + FP \times m_2 \quad (27)$$

式中: FP 为气味浓度; C 为感知因子,本文取0.01; I 为对应的刺激水平,其幂指数 α_1 取0.1; $X_e(t)$ 为精英个体; sortrows 为排序函数; $k1$ 为 $(0,0.1N]$ 上的随机整数; $k2$ 、 $k3$ 为 $(0,N]$ 上的随机整数,且 $k2 \neq k3$; m_1 、 m_2 为动态调整中的位置参数。

HHHO 算法流程图如图1所示。HHHO 算法可以应用于结构优化、调度优化和控制系统设计等一系列优化问题。在高维复杂问题中,许多系统的特征有大量的变量,需要考虑多个变量和约束。此外,高维问题的解空间呈指数级增长,需要使用能够探索更大空间的优化算法,大大增加了计算和存储需求,并且可能导致算法过于关注特定解,阻碍其逃避局部最优的能力。

3 算法测试和有效性分析

选择10个测试函数进行试验。其中,函数 $F_1 \sim F_7$ 为单峰函数, $F_8 \sim F_{10}$ 为多峰函数。通过求解不同算法的平均值,以验证 HHHO 算法的有效性。表1为试验中涉及的测试函数的名称、维度、类型和其他信息。

3.1 算法优化路径可视化分析

在优化路径可视化分析中,将差异学习机制和精英策略分别整合到 HHO 算法中。将所提 HHHO 算法与具有差异学习机制的 HHO (HHO

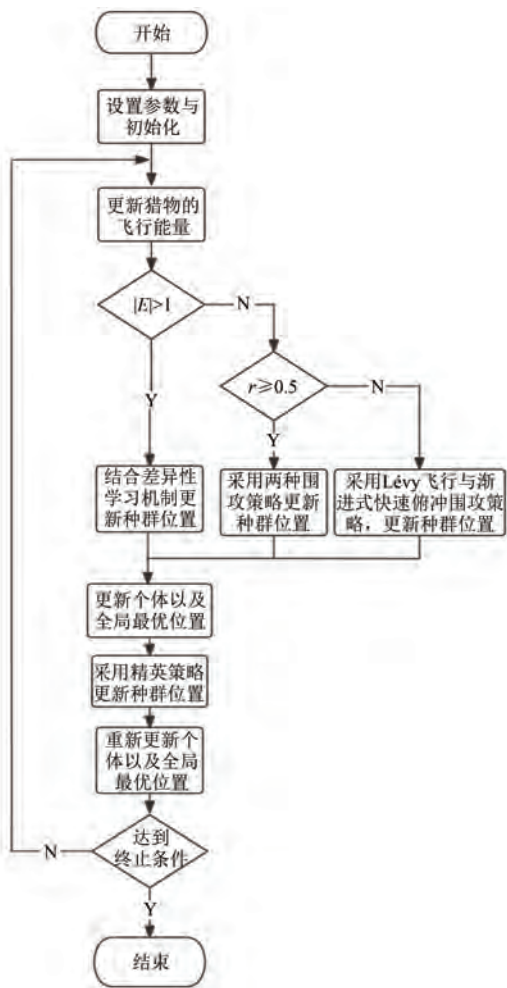


图 1 HHHO 算法流程图
Fig. 1 Flowchart of HHHO algorithm

表 1 测试函数信息

Tab. 1 Test function informations					
函数符号	函数名称	函数类型	维度	极值	搜索范围
F_1	Sphere	单峰	30	0	$[-100, 100]$
F_2	Schwefel 2.22	单峰	10	0	$[-10, 10]$
F_3	Schwefel 2.21	单峰	30	0	$[-100, 100]$
F_4	SumSquare	单峰	30	0	$[-10, 10]$
F_5	Elliptic	单峰	30	0	$[-100, 100]$
F_6	SumPower	单峰	30	0	$[-1, 1]$
F_7	Quartic	单峰	30	0	$[-1.28, 1.28]$
F_8	Rastrigin	多峰	30	0	$[-5.12, 5.12]$
F_9	Ackley	多峰	30	0	$[-32, 32]$
F_{10}	Alpine	多峰	30	0	$[-10, 10]$

with Difference Learning Mechanism, DHHO)算法、

具有精英策略的 HHO (HHO with Elite Strategy, EHHO)算法和 HHO 算法进行对比分析。选择测试函数 F_1 、 F_2 、 F_4 和 F_{10} , 设置种群大小为 50, 迭代次数为 500。四种算法的收敛曲线如图 2 所示。

由图 2 可知, HHO 算法的收敛速度较慢, 后期有停滞倾向, 表明其容易陷入局部最优, 难以快速识别全局最优。EHHO 算法虽然不能加快搜索速度, 但能保持优化过程的稳定性。DHHO 算法在初始阶段表现出了优越的优化效果, 表明差异学习机制通过动态调整种群位置和避免过早收敛, 有效提高了全局搜索能力。HHHO 算法的稳定性最优, 确保了优化过程的可靠性, 并且能够在较少的迭代次数中识别出更高精度的解, 最终收敛到一个较低的目标值。

3.2 算法的有效性检验

为了更直观地评估 HHHO 算法的收敛性, 将其与信息共享的记忆被囊群算法 (Memory Tunicate Swarm Algorithm with Information Sharing, ISMTSA)^[23]、混合蝴蝶优化算法 (Hybrid Butterfly Optimization Algorithm, HBOA)^[21]、改进遗传算法 (Improved Genetic Algorithm, IGA)^[24]、基于自适应惯性权重的樽海鞘群算法 (Salp Swarm Algorithm based on Adaptive Inertia Weight, AIWSSA)^[25] 和 ABC 算法^[26] 进行对比。设置种群大小为 50, 最大迭代次数为 500。六种算法独立运行 15 次的统计结果如表 2 所示。

由表 2 可知, HHHO 算法能够找到测试函数 F_1 、 F_4 、 F_5 、 F_6 和 F_8 的最小值, 显示了对单峰和多峰函数的优化能力。HHHO 算法求解结果的标准差为零, 表明结果稳定。综上可知, HHHO 算法有明显的优越性, 可以求得比较理想的结果。

4 仿真分析

HHHO 算法在处理较小维数问题时具有一定的优势。实际生产中所面临的问题往往更为复杂, 为了进一步探讨源荷不确定性对微电网经济运行影响, 采用 HHHO 算法求解各微源的出力。该算法还可以根据当时的电价、电力是否满足负荷需求等条件, 做出战略决策, 计算出最低的运行成本, 以实现微电网的经济运行。

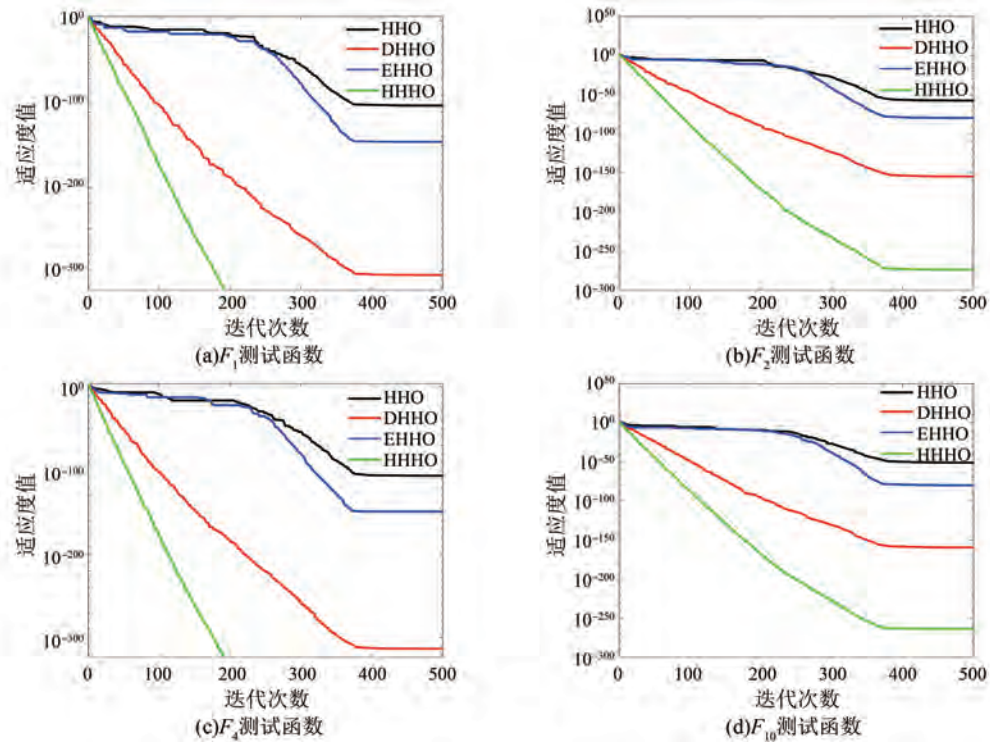


图 2 不同算法的收敛性曲线

Fig. 2 Convergence curves for different algorithms

表 2 算法性能比较结果

Tab. 2 Algorithm performance comparison results

参数名称		HBOA	ISM TSA	IGA	AIWSSA	ABC	HHHO
F_1	平均值	3.4e-292	1.06e-35	942.11	6.42e-48	1.88	0
	标准差	0	1.50e-35	204.79	9.08e-48	0.85	0
F_2	平均值	1.4e-151	6.8e-23	0.0349	8.15e-23	1.91e-15	4.44e-270
	标准差	2.0e-151	9.55e-23	0.014	1.07e-22	2.18e-17	0
F_3	平均值	9.3e-152	4.49e-15	53.73	1.11e-20	52.815	2.78e-262
	标准差	1.3e-151	6.35e-15	10.30	1.10e-20	7.76	0
F_4	平均值	1.6e-313	8.86e-30	385.52	2.65e-47	0.2239	0
	标准差	0	1.25e-29	189.0	3.72e-47	0.081	0
F_5	平均值	4.4e-309	1.19e-23	27 553 607	9.53e-41	360.97	0
	标准差	0	1.69e-23	13 259 893	1.34e-40	131.67	0
F_6	平均值	0	1.68e-66	9.33e-07	2.28e-52	0.000 206	0
	标准差	0	2.38e-66	2.63e-07	2.78e-52	0.000 119	0
F_7	平均值	0.00015	9.63e-05	0.331	0.0021	0.146 7	2.42e-05
	标准差	8.18e-05	6.30e-05	0.216	0.0011	0.047 6	1.75e-05
F_8	平均值	0	0	139.52	0	185.47	0
	标准差	0	0	8.307	0	0.181	0
F_9	平均值	8.88e-16	7.99e-15	19.30	1.22e-15	1.108	8.88e-16
	标准差	0	1.00e-14	0.459	4.79e-16	0.127	0
F_{10}	平均值	2.5e-157	1.94e-05	6.35	2.05e-23	14.80	1.09e-269
	标准差	3.1e-157	2.75e-05	2.89	2.88e-23	2.86	0

从源荷不确定性的角度出发,对不同的场景进行了仿真试验。这些不确定性因素包括风能、PV 等可再生能源的波动以及柴油发电机故障等。风能和 PV 为可再生能源,只考虑运营和维护成本。运行周期为 24 小时,时间间隔为 1 小时。可再生能源以及某地一天负荷需求的预测功率参考文献[27],具体电价参考文献[28],污染系数参考文献[29],如表 3 所示,各微源的功率限制如表 4 所示。

表 3 污染物系数
Tab. 3 Pollutant coefficients

污染物类型	成本系数/ (元·kg ⁻¹)	DG 的排放因子/ (kg·kWh ⁻¹)	MT 的排放因子/ (kg·kWh ⁻¹)
NO _i	66	0.01	2×10 ⁻⁴
SO ₂	15.7	21×10 ⁻⁵	4×10 ⁻⁶
CO ₂	0.22	65×10 ⁻⁵	72×10 ⁻⁵

表 4 各微源的功率限制
Tab. 4 Power limits for each microsource

微源类型	P_{min}/kW	P_{max}/kW
WT	0	15
PV	0	25
DG	5	80
MT	6	40
BS	-30	35
Grid	-40	40

使用蒙特卡罗方法对可再生能源和负荷需求进行抽样,获得初始场景集。随着场景集大小的增加,求解优化模型所需的计算量也会增加。在此基础上,提出了一种基于拉丁超立方采样-概率距离 (Latin Hypercube Sampling-Probability Distance, LHS-PD) 的混合场景削减方法,用于削减初始场景集合 S。最后将削减后的等效场景作为微电网经济运行的依据。LHS 技术在相对较小的样本量下也能获得较高的精度,其与 PD 技术的结合可以提高精度,避免大规模场景的计算困难。

设置 $S=500$ 、区间数 $m=5$ 、从每个场景里取出的场景数 $N=10$ 、剩余场景数 $n=5$ 以及混合情景削减方法的标准差为 0.1。风力、PV 和负载需求的等效图分别如图 3~图 5 所示。

由图 3~图 5 可知,采用所提基于 LHS-PD 的

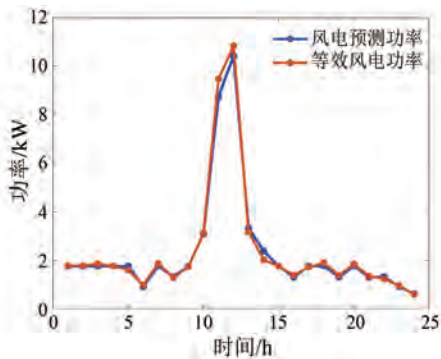


图 3 风力发电情景等效结果
Fig. 3 Equivalent results for wind power generation scenario

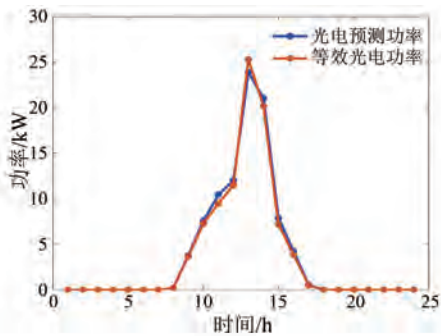


图 4 PV 发电情景等效结果
Fig. 4 Equivalent results of PV power generation scenario

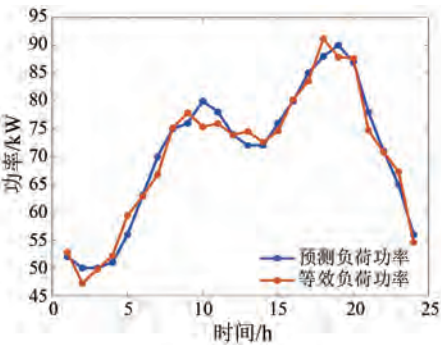


图 5 负荷需求情景等效结果
Fig. 5 Equivalent results of load demand scenario

混合场景削减方法,生成多个等效场景,等效的功率值可以在一定程度上减少源荷不确定性对实际生产的影响,保证微电网的安全运行。并且可再生能源和负荷需求的预测值都有不同程度的偏差,这可以更准确地反映可再生能源和负荷需求相关的不确定性。

以微源故障导致其无法为微电网出力为例,讨论源荷不确定性对微电网经济运行的影

响。设置 DG 在 1~23 小时之间的随机连续 2 小时出现故障,以模拟微源的不稳定性。当 DG 发生故障时,为保持功率平衡,微电网与主电网的功率交换增加,最大交换功率设置为 60 kW。这保证了即使 DG 输出功率为零,微电网仍可以从主电网购买电力,以满足用户的需求,避免发生事故。

为了验证 HHHO 算法的有效性,将其与蝴蝶优化算法 (Butterfly Optimization Algorithm, BOA)^[30]、HBOA、混合正弦余弦算法和 Lévy 飞行的麻雀算法 (Mixing Sine and Cosine with Lévy Flying Chaotic Sparrow Algorithm, ISSA)^[31]、灰狼优化 (Grey Wolf Optimisation, GWO) 算法^[32] 和领导者黏菌算法 (Leader Slime Mould Algorithm, LSMA)^[33] 进行比较。

场景 1 为 DG 在 3~4 时发生故障,场景 2 为 DG 在 21~22 时发生故障。采用 HHHO 算法时场景 1 和场景 2 下微电网的功率曲线如图 6 和图 7 所示。

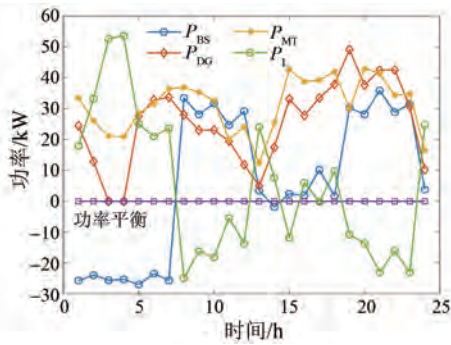


图 6 场景 1 下微电网的功率曲线

Fig. 6 Power curves of the microgrid under scene I

由图 6 可知,3 时为非高峰时段,此时系统负荷需求相对较低,电源的整体压力较低。因为电

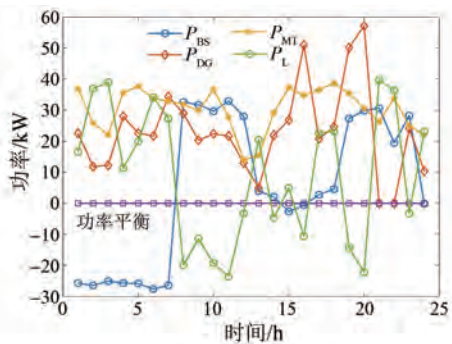


图 7 场景 2 下微电网的功率曲线

Fig. 7 Power curves of the microgrid under scene II

价普遍较低,系统选择从主电网获取大量电力,符合经济运行的原则。BS 在 3 时不释放大量电能,并处于充电状态,以确保以后能够支持更高的负载需求。与主电网的交互功率接近最大值,说明系统严重依赖主电网来弥补 DG 故障造成的电力不足。该策略有助于保持源荷平衡,同时降低总体运行成本。

由图 7 可知,21 时为峰值负荷时段,用户的电力需求显著增加。BS 会在较短时间内释放大量的能量,以快速解决由高负载需求引起的瞬时功率不足。然而,可控微源放电功率达到峰值,无法完全弥补 DG 故障造成的电力不足。由于负荷需求较大,微电网与主电网在 21 时的交互功率相对较高。

在这两种故障情况下,HHHO 算法都能够快速调整功率交换和可控微源的输出,优化调度策略来补偿 DG 故障。场景 1 和场景 2 下几种算法独立运行时的系统成本如表 5 所示。由表 5 可知,两种场景下,对比其他算法,HHHO 算法可以求解出较为理想的成本,并且可以调整调度策略,弥补微源故障对微电网安全、经济运行造成的影响。

表 5 场景 1 和场景 2 下几种算法的系统成本对比

Tab. 5 System cost comparison of several algorithms under scene I and II

参数名称		BOA	HBOA	ISSA	LSMA	GWO	HHHO	HHO
场景 1 系统成本	平均值/元	2 872.2	2 404.5	2 747.1	2 715.2	2 836.1	1 541.2	2 541.2
	标准差/元	23.4	19.0	23.0	23.0	50.7	154.6	425.7
场景 2 系统成本	平均值/元	2 960.8	2 493.2	2 860.7	2 754.2	2 846.5	1 736.8	2 649.5
	标准差/元	23.8	7.0	15.2	26.1	72.5	26.0	127.9

5 结语

为了减轻微电网调度压力,解决微电网最优

经济运行的问题,本文提出了一种 HHHO 算法。通过标准的测试函数和仿真试验,验证了所提算法的优越性。最后,建立了微电网优化模型,探讨

了源荷不确定性对微电网的影响。仿真结果表明所提 HHHO 算法可实现微电网最优经济运行, 为微电网的长期经济运行提供了理论支持。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

李佳讯进行了方案设计、试验研究、内容总结与论文撰写, 李佳讯、张寿明、杨森参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The schematic design, experimental research, content summary and paper writing were carried out by Li Jiaxun. The manuscript was reviewed and revised by Li Jiaxun, Zhang Shouming, and Yang Sen. All authors have read and approved the final version of the paper for submission.

参考文献

- [1] 姚红伟, 张建琪, 温镇, 等. 基于模拟状态信息的虚拟操作场景重构及微电网自适应控制设计[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(10): 77-85.
- YAO H W, ZHANG J Q, WEN Z, et al. Virtual operation scenario reconstruction and microgrid adaptive control design based on simulated state information [J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(10): 77-85.
- [2] 钱佳钰, 赵虎府, 刘文泉, 等. 直流微电网并离网协调控制策略[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(9): 11-23.
- QIAN J Y, ZHAO H F, LIU W Q, et al. Coordinated control strategy for DC microgrid grid-connected and off-grid [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(9): 11-23.
- [3] 刘志坚, 刘杰, 李鹏程, 等. 光储微电网逆变器有限集模型预测控制[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(12): 81-86.
- LIU Z J, LIU J, LI P C, et al. Finite control set model predictive control of photovoltaic and storage microgrid inverter [J]. Electric Machines & Control Application, 2020, 47(12): 81-86.
- [4] 樊晓伟, 王瑞妙, 杨海峰, 等. 计及源荷不确定的综合能源微电网集群优化运行[J]. 电力建设, 2024, 45(8): 128-139.
- FAN X W, WANG R M, YANG H F, et al. Optimization operation of integrated energy microgrid cluster considering source-load uncertainty [J]. Electric Power Construction, 2024, 45(8): 128-139.
- [5] NAIK K M, PANDA R, WUNNAVA A, et al. A leader Harris hawks optimization for 2-D Masi entropy-based multilevel image thresholding [J]. Multimedia Tools and Applications, 2021, 80: 35543-35583.
- [6] PALIWAL K N, SINGH K A, SINGH K N. A day-ahead optimal energy scheduling in a remote microgrid along with battery storage system via global best guided ABC algorithm [J]. Journal of Energy Storage, 2019, 25: 100877.
- [7] 李咸善, 王苗. 考虑源荷不确定性的多微电网鲁棒优化调度与 VCG 机制竞价策略[J]. 电网技术, 2023, 47(6): 2330-2345.
- LI X S, WANG M. Optimization operation of integrated energy microgrid cluster considering source-load uncertainty [J]. Power System Technology, 2023, 47(6): 2330-2345.
- [8] 栗然, 王欣鹏, 白杨, 等. 考虑氢储能与源荷不确定性的微网优化配置[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2025, 52(3): 32-4153.
- LI R, WANG X P, BAI Y, et al. Optimal configuration of microgrid regarding hydrogen energy storage and source-load uncertainty [J]. Journal of North China Electric Power University: Natural Science Edition, 2025, 52(3): 32-4153.
- [9] CHEN H P, GAO L, ZHANG Z. Multi-objective optimal scheduling of a microgrid with uncertainties of renewable power generation considering user satisfaction [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems 2021, 131: 107142.
- [10] WU H B, LIU X Y, DING M. Dynamic economic dispatch of a microgrid: Mathematical models and solution algorithm [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2014, 63: 336-346.
- [11] ZHANG X Z, WANG Z Y, LU Z Y. Multi-objective load dispatch for microgrid with electric vehicles using modified gravitational search and particle swarm

- optimization algorithm [J]. Applied Energy, 2022, 306: 118018.
- [12] ZHANG J Y, WU Y, GUO B, et al. A hybrid harmony search algorithm with differential evolution for day-ahead scheduling problem of a microgrid with consideration of power flow constraints [J]. Applied Energy, 2016, 183: 791-804.
- [13] 齐先军, 程桥, 吴红斌, 等. 激励型需求响应对配电网运行可靠性的影响 [J]. 电工技术学报, 2018, 33(22): 5319-5326.
- QI X J, CHENG Q, WU H B, et al. Impact of incentive-based demand response on operational reliability of distribution network [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33 (22): 5319-5326.
- [14] HUANG Y, HE G S, PU Z X, et al. Multi-objective particle swarm optimization for optimal scheduling of household microgrids [J]. Frontiers in Energy Research, 2024, 11: 1354869.
- [15] 吕智林, 叶亮, 孙功伟, 等. 考虑分时电价机制的多微电网与主动配电网双层优化调度[J]. 广东电力, 2022, 35(3): 55-63.
- LYU Z L, YE L, SUN G W, et al. Bi-level optimized scheduling of multi-microgrids and active distribution network considering TOU electricity price [J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35(3): 55-63.
- [16] 孙林, 李梦梦, 徐久成. 二进制哈里斯鹰优化及其特征选择算法[J]. 计算机科学, 2023, 50(5): 277-291.
- SUN L, LI M M, XU J C. Binary Harris Hawk optimization and its feature selection algorithm [J]. Computer Science, 2023, 50(5): 277-291.
- [17] 柴岩, 任生. 多策略协同优化的改进 HHO 算法 [J]. 计算机应用研究, 2022, 39(12): 3658-3666 +3677.
- CHAI Y, REN S. Improved HHO algorithm based on multi-strategy cooperative optimization [J]. Application Research of Computers, 2022, 39(12): 3658-3666+3677.
- [18] HEIDARI A A, MIRJALILI S, FARIS H, et al. Harris hawks optimization: Algorithm and applications [J]. Future Generation Computer Systems, 2019, 97: 849-872.
- [19] 付光杰, 朱永浩. 基于混沌哈里斯鹰算法的最大功率追踪 [J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2024, 42(6): 1066-1073.
- FU G J, ZHU Y H. Maximum power tracking based on chaotic harris hawk algorithm [J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition), 2024, 42 (6): 1066-1073.
- [20] 黄志锋, 刘媛华. 多策略融合的改进哈里斯鹰算法及其路径规划应用[J]. 小型微型计算机系统, 2024, 45(9): 2102-2109.
- HUANG Z F, LIU Y H. Multi-strategy fusion improved Harris Hawk algorithm and its path planning application [J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2024, 45(9): 2102-2109.
- [21] SUN G H, YANG S, ZHANG S M, et al. A hybrid butterfly algorithm in the optimal economic operation of microgrids [J]. Mathematical Biosciences and Engineering, 2024, 21(1): 1738-1764.
- [22] ARORA S, SINGH S. Butterfly optimization algorithm: A novel approach for global optimization [J]. Soft Computing, 2019, 23(3): 715-734.
- [23] 屈迟文, 彭小宁. 信息共享的记忆被囊群算法 [J]. 模式识别与人工智能, 2021, 34(7): 605-618.
- QU C W, PENG X N. Memory tunicate swarm algorithm with information sharing [J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2021, 34 (7): 605-618.
- [24] 刘耀, 王焜正, 秦浩林. 基于改进遗传算法的大数据中心资源分配方法[J]. 软件, 2024, 45(8): 1-3.
- LIU Y, WANG K Z, QIN H L. A resource allocation method for big data centers based on improved genetic algorithm [J]. Software, 2024, 45(8): 1-3.
- [25] 白钰, 彭珍瑞. 基于自适应惯性权重的樽海鞘群算法[J]. 控制与决策, 2022, 37(1): 237-246.
- BAI Y, PENG Z R. Salp swarm algorithm based on adaptive inertia weight [J]. Control and Decision, 2022, 37(1): 237-246.
- [26] 何尧, 刘建华, 杨荣华. 人工蜂群算法研究综述 [J]. 计算机应用研究, 2018, 35(5): 1281-1286.
- HE Y, LIU J H, YANG R H. Survey on artificial bee colony algorithm [J]. Application Research of Computers, 2018, 35(5): 1281-1286.
- [27] REZVANI A, GANDOMKAR M, IZADBAKHS M, et al. Environmental/economic scheduling of a microgrid with renewable energy resources [J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 87: 216-226.
- [28] 李正茂, 张峰, 梁军, 等. 含电热联合系统的微电

- 网运行优化[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3569-3576.
- LI Z M, ZHANG F, LIANG J, et al. Optimization on microgrid with combined heat and power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3569-3576.
- [29] MOHAMED A F, KOIVO N H. System modelling and online optimal management of microgrid using mesh adaptive direct search [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2009, 32(5): 398-407.
- [30] 高文欣, 刘升, 肖子雅, 等. 全局优化的蝴蝶优化算法[J]. 计算机应用研究, 2020, 37(10): 2966-2970.
- GAO W X, LIU S, XIAO Z Y, et al. Butterfly optimization algorithm for global optimization [J]. Application Research of Computers, 2020, 37(10): 2966-2970.
- [31] 毛清华, 张强, 毛承成, 等. 混合正弦余弦算法和 Lévy 飞行的麻雀算法[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2021, 44(6): 1086-1091.
- MAO Q H, ZHANG Q, MAO C C, et al. Mixing sine and cosine algorithm with Lévy flying chaotic sparrow algorithm [J]. Journal of Shanxi University (Natural Science Edition), 2021, 44(6): 1086-1091.
- [32] 邓飞, 魏玮璇, 刘奕巧, 等. 灰狼优化算法的改进及其应用[J]. 统计与决策, 2023, 39(11): 18-24.
- DENG F, WEI Y X, LIU Y X, et al. Improvement and application of grey wolf optimization algorithm [J]. Statistics & Decision, 2023, 39(11): 18-24.
- [33] NAIK M K, PANDA R, ABRAHAM A. Normalized square difference based multilevel thresholding technique for multispectral images using leader slime mould algorithm [J]. Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences, 2022, 34(7): 4524-4536.

收稿日期:2025-05-20

收到修改稿日期:2025-06-17

作者简介:

李佳讯(2000-),男,硕士研究生,主要研究方向为微电网经济优化运行,1263713031@qq.com;

* 通信作者:张寿明(1966-),男,博士,教授,主要研究方向为复杂控制系统,2559445607@qq.com。