

DOI: 10.20271/j.cnki.1673-9833.2026.3004

基于改进人工蜂鸟算法的主动配电网无功优化

陈泽文¹, 宁志毫², 曾进辉¹, 周武定¹

(1. 湖南工业大学 交通与电气工程学院, 湖南 株洲 412007;
2. 国网湖南省电力有限公司电力科学研究院, 湖南 长沙 410007)

摘要: 随着众多分布式电源并入电网, 主动配电网在应对分布式电源输出功率的不稳定性和协调配电网内多样化的无功补偿设备方面, 正面临着严峻挑战。对于当前配电网中出现的电压偏移量过大、网损过高的问题, 引入了一种基于PV曲线上支解与鞍点电压差值的新电压稳定性指标, 构建了旨在得到最低网络损耗、最小化电压偏移量以及提升电压稳定性的多目标函数优化模型。通过改进人工蜂鸟算法来求解上述模型, 为提高算法的性能, 引入了Tent混沌映射方法使种群分布更加均匀和引入变异操作避免算法陷入局部最优。在IEEE-33节点系统中进行仿真验证, 结果表明, 相较于传统算法, 采用改进后的人工蜂鸟算法对该模型进行优化, 能够显著减少电压偏移量并降低有功损耗, 从而保障电网的稳定运行。

关键词: 主动配电网; 改进人工蜂鸟算法; 无功优化; Tent混沌

中图分类号: TM727

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2026)03-0024-09

引文格式: 陈泽文, 宁志毫, 曾进辉, 等. 基于改进人工蜂鸟算法的主动配电网无功优化[J]. 湖南工业大学学报, 2026, 40(3): 24-32.

Study on Reactive Power Optimization in Active Distribution Networks Based on an Improved Artificial Hummingbird Algorithm

CHEN Zewen¹, NING Zhihao², ZENG Jinhui¹, ZHOU Wuding¹

(1. School of Transportation and Electrical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;
2. State Grid Hunan Electric Power Company Limited Electric Power Research Institute, Changsha 410007, China)

Abstract: In view of the significant challenges for active distribution networks when addressing the instability of distributed power output and coordinating diverse reactive power compensation devices within the network as numerous distributed power sources are integrated into the grid, a novel voltage stability index has thus been introduced on the basis of the branch decomposition and saddle point voltage difference in the PV curve so as to address the issues of excessive voltage deviation and high network losses in the current distribution network. By improving the artificial hummingbird algorithm to solve the above-mentioned model, in order to enhance the performance of the algorithm, Tent chaotic mapping method is introduced to realize a more uniform population distribution, with mutation operation introduced to avoid the algorithm from getting trapped in local optima. With a simulation validation conducted in the IEEE-33 system, the results demonstrate that compared to traditional algorithms, an optimization of the model with the improved artificial hummingbird algorithm significantly reduces voltage deviation and active power losses, thereby ensuring stable operation of the power grid.

收稿日期: 2024-11-26

基金项目: 国家自然科学基金资助面上项目(52377185)

作者简介: 陈泽文, 男, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为电力系统优化调控技术, E-mail: 1446346086@qq.com

通信作者: 宁志毫, 男, 国网湖南省电力有限公司电力科学研究院高级工程师, 博士, 主要从事电能质量分析与控制, 新能源并网测试与评估等, E-mail: nzh223@163.com

Keywords: active distribution network; improved artificial hummingbird algorithm; reactive power optimization; Tent chaos

1 研究背景

在“双碳”目标和新型电力系统背景下,多种可调节资源的协同运行已成为电力系统运行的显著特征,但这同时让电网损耗的机制和降低损耗变得更加复杂^[1-2]。为了应对上述问题,各国正积极推动分布式能源的发展,并致力于提高可再生能源在电力生产中的利用效率。当前,我国正在稳步推进多种分布式电源接入配电网,此举对缓解能源紧张起到了积极作用。但分布式电源的高比例并网也给传统配电系统运行带来了诸多技术难题^[3]。

分布式电源作为一种新型能源供应模式,以其分布广泛、环保无污染等特性,对推动传统能源技术向清洁可持续转型具有重要意义。然而,分布式电源的出力稳定性受地理环境制约,易呈现不稳定特性。随着大量分布式电源接入配电网,传统配网规划方法难以适用。若不进行合理规划,可能导致系统电压质量降低、网损增加、潮流反向等一系列电网安全隐患^[4-5]。无功优化是解决上述问题的关键手段,通过调整无功控制设备运行策略,优化系统整体运行效能,实现最优电力潮流分布。

目前,在配电网无功优化领域,国内外众多学者已经对其进行了深入研究。文献[6-7]构建的多目标优化模型实现了配电网经济性和安全性的双重提升,主要通过3个核心目标函数实现运行成本降低、线路损耗减少以及电压波动控制。在求解模型过程中,研究者对传统的人工蜂群算法进行了改进,引入了混沌扰动策略和高斯变异,这一举措不仅显著降低了运营成本,而且降低了网络损耗。文献[8]对分布式电源(distributed generation, DG)的输出功率特性进行了细致剖析,并运用改进的退火粒子群算法求解,求得该多目标优化数学模型的最优解。文献[9]通过引入一种融合记忆机制的多目标蜻蜓优化算法,成功求解了系统网损、电压波动、无功电源投资最小的无功优化问题。文献[10]开发了一种自适应多目标优化的人工算法,旨在确保电压稳定裕度维持在预设水平的同时有效分配无功功率,进而减少有功损耗并稳定电网中的节点电压。文献[11]通过引入多目标鲸鱼算法,有效降低了网损和电压偏差。文献[12]采用了深度强化学习方法优化电网无功电压,建模时

考虑了效率、经济、安全,并通过强化学习和深度确定性策略梯度(deep deterministic policy gradient, DDPG)算法求解,且考虑了设备的时空特性。综上,目前大多数文献都是对单目标或者多目标模型进行优化,却未对电压稳定性方面进行分析,并且许多算法在求解时容易陷入局部最优,全局收敛性不足等困境。

为解决以上问题,本文在无功优化研究中纳入配电网的电压稳定性考量,首先选取有功网损、电压偏移以及电压稳定性指标作为目标函数,构建一个含分布式电源的配电网无功优化模型。其次在标准人工蜂鸟算法(artificial hummingbird algorithm, AHA)中,引入变异策略和Tent映射混沌序列以改进完善该算法。为验证模型的可行性和改进人工蜂鸟算法(improved artificial hummingbird algorithm, IAHA)的有效性,本研究采用了IEEE 33节点系统进行仿真验证。

2 配电网无功优化数学建模

基于安全性考虑,构建了配电网无功优化模型,将线路网损降至最低、电压偏移控制到最小和电压稳定性提升至最大。

2.1 目标函数

2.1.1 网络损耗

网络损耗公式为

$$P_{\text{loss}} = \sum_{k=1}^{N_1} G_k (U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos \theta_{ij}), \quad (1)$$

式中: N_1 为配电网支路总数; G_k 为支路 k 的电导; U_i 、 U_j 分别为节点 i 与 j 的电压幅值; θ_{ij} 为节点 i 与 j 间的相角差。

2.1.2 电压偏移

电压偏移公式为

$$\Delta U = \sum_{i=1}^{N_B} \left| \frac{U_i - U_i^{\text{spec}}}{U_i^{\text{max}} - U_i^{\text{min}}} \right|, \quad (2)$$

式中: N_B 为配电网节点总数; U_i^{max} 、 U_i^{min} 分别为节点 i 的电压幅值上界和下界; U_i^{spec} 为节点 i 的电压参考值。

2.1.3 新型电压稳定性指标

分布式发电并入电网时会显著影响其电压稳定

性。由于当前电网中的设备越来越接近运行临界状态,本文提出一种基于PV曲线上半支解与鞍点电压差值的电压稳定评估指标。

配电网中,由于电压等级较低,线路对地导纳影响可忽略不计,因此可以将单条支路模型简化为图1所示的形式。

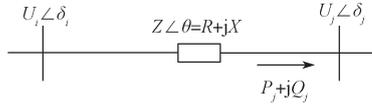


图1 单条支路模型简化图

Fig. 1 Single branch circuit model simplificationschematic diagram

图1中, i 为首端节点, j 为末端节点, $U_i \angle \delta_i$ 、 $U_j \angle \delta_j$ 分别为首末端节点电压, $P_j + jQ_j$ 为首端流向末端的潮流, $R + jX$ 为首端到末端的线路阻抗。

由线路潮流方程得:

$$P_j - jQ_j = \dot{U}_j^* \left(\frac{U_i \angle \delta_i - U_j \angle \delta_j}{Z \angle \theta} \right), \quad (3)$$

分离实部和虚部得:

$$P_j = \frac{U_i U_j}{Z} \cos(\theta - \delta) - \frac{U_j^2}{Z} \cos \theta, \quad (4)$$

$$Q_j = \frac{U_i U_j}{Z} \sin(\theta - \delta) - \frac{U_j^2}{Z} \sin \theta. \quad (5)$$

式(4)(5)中: $\delta = \delta_i - \delta_j$ 。

联立式(4)(5)可得:

$$RP_j + XQ_j = -U_j^2 + U_i U_j \cos \delta, \quad (6)$$

$$RQ_j - XP_j = -U_i U_j \sin \delta. \quad (7)$$

联立式(6)(7), 分别消去 P_j 、 Q_j 得:

$$U_j^2 \cos \theta - U_i U_j \cos(\theta - \delta) = -P_j Z, \quad (8)$$

$$U_j^2 \sin \theta - U_i U_j \sin(\theta - \delta) = -Q_j Z. \quad (9)$$

联立式(8)(9)可得:

$$U_j \sqrt{U_i^2 - 2U_i U_j \cos \delta + U_j^2} = S_j Z, \quad (10)$$

式中 $S_j = \sqrt{P_j^2 + Q_j^2}$ 。

联立式(6)(10), 消去 δ 得:

$$U_j^4 - 2U_j^2 \left(\frac{U_i^2}{2} - P_j R - Q_j X \right) + S_j^2 Z^2 = 0. \quad (11)$$

由于PV曲线上的电压值大于0, 得式(11)的解为

$$U_{j1,2} = \sqrt{\left(\frac{U_i^2}{2} - P_j R - Q_j X \right) \pm \sqrt{\left(\frac{U_i^2}{2} - P_j R - Q_j X \right)^2 - S_j^2 Z^2}}. \quad (12)$$

电压随负荷变化曲线如图2所示。

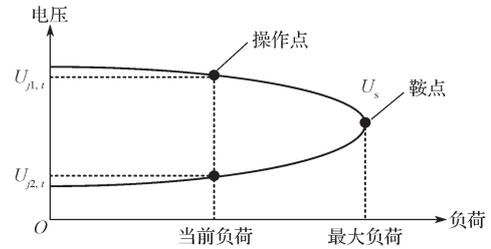


图2 电压随负荷变化曲线图

Fig. 2 Curve diagram of voltage variation with load

如图2, 在 t 时段内, PV曲线的上半部分和下半部分分别对应不同的电压解 $U_{j1,t}$ 、 $U_{j2,t}$, 鞍点电压为 U_s , 当系统将要逼近崩溃临界点之际, $U_{j1,t}$ 会移向鞍点状态。在系统保持稳定运行直至接近极限状态之时, 则有

$$\sqrt{\left(\frac{U_i^2}{2} - P_j R - Q_j X \right) + \sqrt{\left(\frac{U_i^2}{2} - P_j R - Q_j X \right)^2 - S_j^2 Z^2}} - U_s \geq 0. \quad (13)$$

通过对式(13)进行推导, 得到了支路的电压稳定性指标:

$$L_{\text{det}} = 1 - \sqrt{\left(\frac{U_i^2}{2} - P_j R - Q_j X \right) + \sqrt{\left(\frac{U_i^2}{2} - P_j R - Q_j X \right)^2 - S_j^2 Z^2}} + U_s \leq 1. \quad (14)$$

通过计算所有支路中电压稳定性指标的最大值来评估该配电网系统的电压稳定状况^[13], 则有

$$L_{\text{det, max}} = \max_{k \in N} L_{\text{det, } k} \quad (15)$$

式中: k 为支路编号; N 为配电系统中的支路集;

$L_{\text{det, max}}$ 为系统的电压稳定性指标。

2.1.4 电压稳定性指标验证

本文以IEEE-33节点系统作为验算案例。首先使用连续潮流计算系统的最大负荷增长率。负荷模型采用恒功率负荷, 并且设定系统负荷为各自初始的功率因素, 随着负荷增长率 λ 的增长而增加。图3中最大

负荷电流 I_{max} 对应最大负荷率 λ_{max} 。由图3可知, 当 $\lambda=2.3$ 时, PV曲线达到鞍点处, 即系统崩溃点, 故计 $\lambda_{\text{max}}=2.3$ 。并且与文献[14]中的 L_q 指标和文献[15-16]中的 L_p 指标进行仿真比较, 通过图3可以得出 L_{det} 指标是单调递增的, 准确性较好, 且线性度优于 L_p 和 L_q 。

为了保证配电网安全稳定运行, 本文采用权重系数法, 以将各优化目标归一化, 并执行加权求和。该过程将复杂多目标问题转化为单目标问题。

本文中, 首先对子目标进行无量纲化处理, 随后按照有功网损优先级高于电压偏移、电压偏移优先

级高于电压稳定性的顺序进行分析, 多个目标函数采用层次分析法^[17]统一表达为

$$F = \min \omega_1 \frac{P_{\text{loss}}}{P_{\text{loss}0}} + \omega_2 \frac{\Delta U}{\Delta U_0} + \omega_3 \frac{L_{\text{det}}}{L_{\text{det}0}} \quad (16)$$

式中: ω_1 、 ω_2 、 ω_3 为权重系数, 且满足 $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1$ 。

在本文中, 线路网损、电压偏移和电压稳定性指标的权值赋值分别为 0.7, 0.2, 0.1。

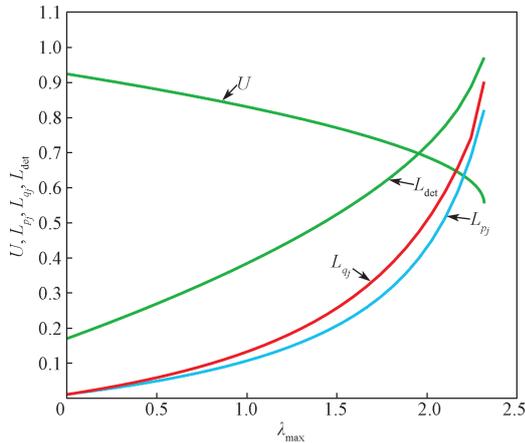


图3 电压稳定指标分析图

Fig. 3 Analysis diagram of voltage stability indices

2.2 约束条件

1) 等式约束如下:

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{j \in i} (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}); \\ Q_i = U_i \sum_{j \in i} (G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij}). \end{cases} \quad (17)$$

式中: P_i 、 Q_i 分别为对应节点 i 的有功功率和无功功率; G_{ij} 、 B_{ij} 、 θ_{ij} 分别为支路 $i-j$ 的电导、电纳、电压相角。

2) 不等式约束如下:

$$\begin{cases} U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max}, & i = 1, 2, \dots, N_B; \\ Q_{DG_i}^{\min} \leq Q_{DG_i} \leq Q_{DG_i}^{\max}, & i = 1, 2, \dots, N_{DG}; \\ Q_{CB_i}^{\min} \leq Q_{CB_i} \leq Q_{CB_i}^{\max}, & i = 1, 2, \dots, N_{CB}; \\ Q_{SVC_i}^{\min} \leq Q_{SVC_i} \leq Q_{SVC_i}^{\max}, & i = 1, 2, \dots, N_{SVC}. \end{cases} \quad (18)$$

式中: $Q_{DG_i}^{\max}$ 、 $Q_{DG_i}^{\min}$ 分别为分布式电源 DG 向节点 i 输出无功输出的上下限; $Q_{CB_i}^{\max}$ 、 $Q_{CB_i}^{\min}$ 分别为并联无功补偿电容器无功功率的上下限; $Q_{SVC_i}^{\max}$ 、 $Q_{SVC_i}^{\min}$ 分别为 SVC 无功输出上下限; N_B 、 N_{DG} 、 N_{CB} 、 N_{SVC} 分别为配电网中所有节点、DG 接入节点、CB 补偿节点、SVC 接入节点数量的集合。

3 基于改进人工蜂鸟的无功优化算法

由于主动配电网的无功优化由众多变量决定, 本文在优化网损和电压偏移的基础上, 额外纳入了电压

稳定性指标, 从而进一步增加了决策变量的多样性和复杂性。由于传统的优化算法容易陷入局部最优和种群多样性低, 对本文模型的优化效果有限, 因此, 本文提出了一种改进人工蜂鸟的无功优化算法, 以提高对本文模型的优化效果。

3.1 Tent 混沌序列

为了避免人工蜂鸟算法在接近全局最优解阶段时陷入局部最优的情况, 在蜂鸟种群位置初始化环节引入混沌序列^[18]。

Tent 映射的表达式如下:

$$X_{n+1} = \begin{cases} X_n / \alpha, & 0 < X_n \leq \alpha; \\ (1 - X_n) / (1 - \alpha), & \alpha < X_n \leq 1. \end{cases} \quad (19)$$

式中: n 为映射次数; X_n 为第 n 次映射函数值; α 为映射控制参数。

3.2 遗传操作

遗传算法是一种启发式优化方法, 其灵感来源于自然界中的优胜劣汰原则^[19], 通过加入遗传算法中的选择、交叉和变异等操作方法, 可有效防止 AHA 算法中蜂鸟陷入局部最优^[20]。

本文取适应度最优的前 10 个个体的, 将其均分为两组, 进行单点交叉运算。具体步骤如下:

首先, 确定交叉位置。在本研究中设置交叉点位于个体长度的一半处。其次, 执行交叉操作。从当前种群中随机选择两个父代个体, 记为 A 和 B。将个体 A 交叉点之后的部分替换为父代个体 B 的相应部分, 生成子代个体 A'。同时将个体 B 交叉点之后的部分替换为父代个体 A 的相应部分, 生成子代个体 B'。

然后, 引入非均匀变异操作以进一步增加种群的多样性, 并促使算法在搜索空间中探索新的潜在解。该操作的特点在于其变异幅度会随着迭代次数的增加而逐渐减小, 从而在算法早期引入较大的变异以促进全局搜索, 而在算法后期则减小变异幅度以进行局部精细搜索。此变异式为

$$\tilde{x}_i' = \begin{cases} X_i' + \Delta(L_{\text{up}} - X_i'), & r \leq 0.5; \\ X_i' - \Delta(X_i' - L_{\text{low}}), & r > 0.5. \end{cases} \quad (20)$$

$$\Delta(y, t) = [1 - r^{(t-T)}]. \quad (21)$$

式(20)(21)中: \tilde{x}_i' 为变异后的变量; L_{up} 为搜索空间的上界; L_{low} 为搜索空间的下界; r 为 $[0, 1]$ 中符合均匀分布的随机数; t 为当前迭代次数; T 为最大迭代次数; $\Delta(y, t)$ 为变异步长。

3.3 改进人工蜂鸟算法

3.3.1 初始化

为了初始化蜂鸟食物源位置, 采用了 Tent 映射生成的混沌序列确保位置的多样性和不可预测性,

具体参数参见文献 [21]。种群和食物源数量具体参见文献 [22]。

在初始化阶段,会对蜂鸟种群的食物源位置及其访问记录表进行设定。首先,利用公式 (22) 设定蜂鸟种群中各个体的初始位置,其次,利用公式 (23) 初始化它们的访问表。

$$x_i = L_{\text{low}} + r(L_{\text{up}} - L_{\text{low}}), i = 1, \dots, n_0 \quad (22)$$

$$v_{i,j} = \begin{cases} 0, & i \neq j; \\ \text{null}, & i = j; \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n_0 \quad (23)$$

式 (22) (23) 中: x_i 为第 i 个食物源的位置; i 和 j 分别为第 i 只蜂鸟和第 j 个食物源,其中对于 $i=j$, $v_{i,j} = \text{null}$ 表示蜂鸟正在其特定食物来源处进食,故而访问表对角线元素全部为 null; 对于 $i \neq j$, $v_{i,j} = 0$ 表示第 j 个食物源刚被第 i 只蜂鸟在当前迭代中访问过。

3.3.2 飞行技能

蜂鸟具备 3 种飞行能力: 轴向、对角线及全方向飞行,这些能力在算法层面表现为对解空间不同维度的方向控制。

轴向飞行的数学表达式为

$$D^i = \begin{cases} 1, & \text{if } i = \text{randint}([1, d]); \\ 0, & \text{else}; \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, d. \quad (24)$$

对角线飞行的数学表达式为

$$D^i = \begin{cases} 1, & \text{if } i = P(j), j \in (1, k), P = \text{randperm}(k), \\ & k \in [2, [r_1(d-2)+1]]; \\ 0, & \text{else}; \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, d. \quad (25)$$

全方向飞行的数学表达式为

$$D^i = 1, i = 1, 2, \dots, d. \quad (26)$$

式 (24) ~ (26) 中: $\text{randint}([1, d])$ 为在 $1 \sim d$ 之间随机生成一个整数; $\text{randperm}(k)$ 为建立一个 $1 \sim k$ 之间整数的随机排列; r_1 为 $(0, 1]$ 区间内的随机数。

3.3.3 觅食方式

蜂鸟具有 3 种觅食方式,分别是引导觅食、区域觅食和迁徙觅食。蜂鸟会借助这 3 种飞行能力到达目标食物源,所以能得到候选食物源的位置。因此,根据当前存在的食物源中的优质目标,会对原有的食物源进行更新,以获取新的食物来源。引导觅食以及候选食物源的数学公式如下:

$$v_i(t+1) = x_{i,\text{tar}}(t) + aD(x_i(t) - x_{i,\text{tar}}(t)), \quad (27)$$

$$a \sim N(0, 1). \quad (28)$$

式 (27) (28) 中: $x_i(t)$ 为第 i 个食物源在第 t 次迭代时的位置; $x_{i,\text{tar}}(t)$ 为蜂鸟将要访问的目标食物源位置; a 为引导因子,服从正态分布 $N(0, 1)$ 。

式 (27) 表示假如候选的食物源的花蜜填充率比

当前食物源更好,蜂鸟将会放弃当前的食物源,转向式 (27) 中得出的候选食物源的坐标。

式 (27) 使每个现有食物源位置根据目标食物源进行调整,并且利用不同的飞行技能模拟蜂鸟的觅食行为。根据更新后的食物源位置评估适应度后,会相应地更新各个食物来源坐标,数学公式为

$$x_i(t+1) = \begin{cases} x_i(t), & f(x_i(t)) \leq f(v_i(t+1)); \\ v_i(t+1), & f(x_i(t)) > f(v_i(t+1)). \end{cases} \quad (29)$$

式中, $f(\cdot)$ 为适应度函数值,与式 (27) (28) 中的食物源坐标有关。

蜂鸟探访一个食物源后,可能会继续探索其他位置的新食物源,以此发现更佳的选择。在算法设计中,设定引导觅食与区域觅食的概率各占 50%,这巧妙地反映了觅食行为的随机本质。蜂鸟区域觅食的方式和候选食物源的数学式为

$$v_i(t+1) = x_i(t) + bDx_i(t), \quad (30)$$

$$b \sim N(0, 1). \quad (31)$$

式 (30) (31) 中: b 为区域因子,符合正态分布 $N(0, 1)$,均值和标准差分别为 0 和 1。

式 (30) 所描述的行为逻辑为蜂鸟可借助自身飞行本领在周围坐标获得新的食物源。在进行区域觅食操作完成后,访问表的数据也将更新。

当蜂鸟在其活动范围及周边区域遭遇食物短缺时,为了维持生存,它们会选择迁徙至其他区域。在这个过程中,蜂鸟会转而寻找全新的食物来源,并放弃原有的食物源,其访问也将随之更新。此时蜂鸟从花蜜填充率最低的食物源转移到新的食物源处的数学公式为

$$x_{\text{wor}}(t+1) = L_{\text{low}} + r(L_{\text{up}} - L_{\text{low}}), \quad (32)$$

式中 x_{wor} 为种群内花蜜补充率最低的食物源。

3.4 寻优过程

图 4 为改进后的 AHA 算法流程图,具体描述如下。

步骤 1 初始化参数。

步骤 2 利用 Tent 映射确定蜂鸟的初始位置,再计算其适应度。初始化每只蜂鸟对各食物源的访问优先级,并将这些信息记录在访问表中。本文中最大迭代次数 T 为 30。

步骤 3 执行引导觅食、区域觅食、迁徙觅食操作,以更新潜在食物源的位置。

步骤 4 采用变异策略对食物源位置进行调整,并重新评估其适应度值。接着更新食物源的位置,并通过对比筛选,保留最佳食物源位置。

步骤 5 检查当前迭代次数 t 是否达到停止条件。若已达到,则输出最优解的相关信息;若未达到,则

将迭代次数增加 1, 并返回至步骤 3 继续操作。

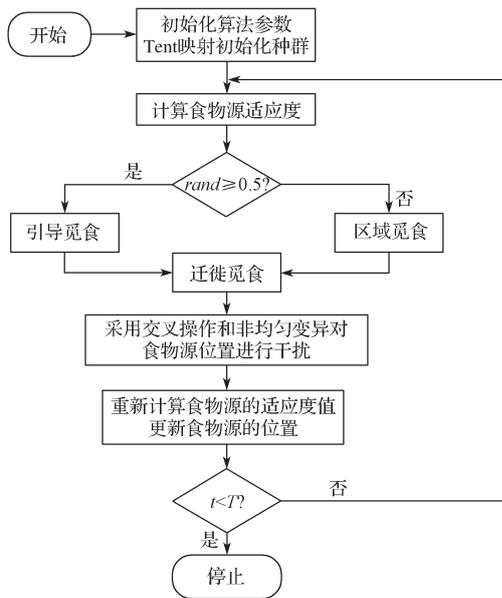


图 4 IAHA 算法流程图

Fig. 4 Flowchart of the improved artificial hummingbird algorithm

4 仿真分析

4.1 仿真系统设置

为了验证本文提出方法的正确性和有效性, 本次实验采用改进的 IEEE-33 节点系统, 该系统总共包括 33 个母线节点系统, 基准电压为 U_B 为 12.66 kV, 基准功率 S_B 为 10 MV·A; 容量为 800 kvar 的 SVC 接入 15 和 30 节点; 容量为 10 kvar 电容器组 1 和电容器组 2 分别接入 9 和 32 节点, 共 20 组, 最大投切次数为 10; 光伏 (PV) 接入 21 和 25 节点, 最大容量为 500 kW; 风电 (WT) 接入 18 和 33 节点, 最大容量为 600 kW。拓扑图如图 5 所示。

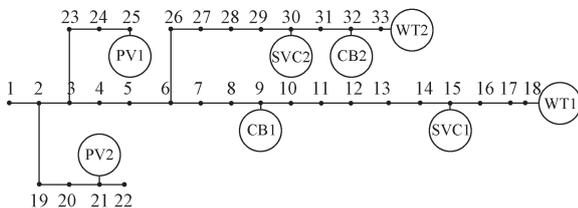


图 5 改进的 IEEE-33 节点拓扑图

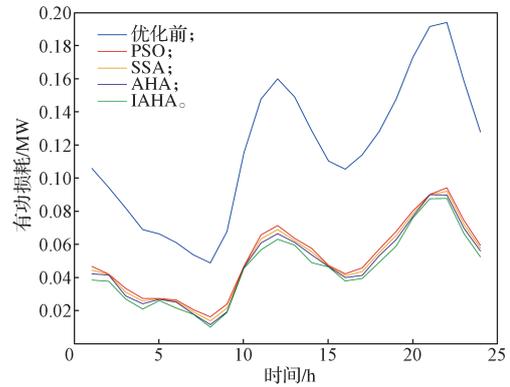
Fig. 5 Improved IEEE-33-node diagram

本次实验分别采用基于粒子群算法的配电网无功优化方法、基于麻雀搜索算法的配电网无功优化方法、基于人工蜂鸟算法的配电网无功优化方法和基于改进人工蜂鸟算法的配电网无功优化方法优化测试系统, 并通过对比全面评估其改进性能。

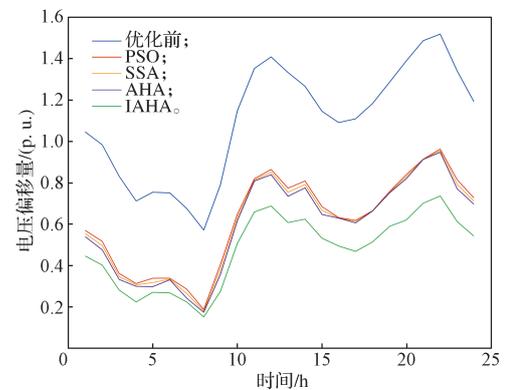
4.2 算法比较分析

此次实验分别采用上述 4 种方法对改进的 IEEE-

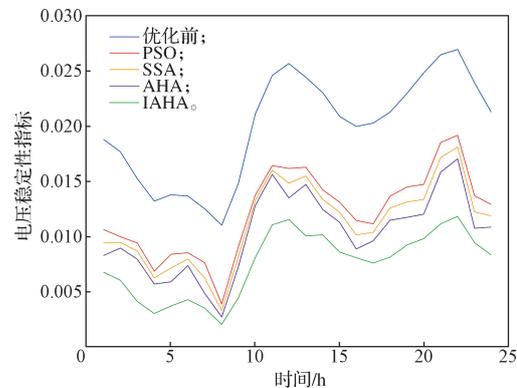
33 系统进行无功优化, 各方法的仿真结果如图 6 和表 1 所示。



a) 网损对比



b) 电压偏移对比



c) 电压稳定性指标对比

图 6 不同算法优化前后的仿真结果图

Fig. 6 Result graphs before and after optimization using different algorithms

表 1 不同算法结果对比

Table 1 Comparison of different algorithm results

算法	有功网损 /MW	标么值下 电压偏移之和	电压稳定性 指标之和
优化前	2.810	26.375	0.479
PSO	1.230	14.839	0.295
SSA	1.192	14.550	0.271
AHA	1.155	14.261	0.248
IAHA	1.097	11.431	0.182

由图 6 可知,不同算法优化前后的有功损耗、电压偏移量、电压稳定性指标的变化趋势大体一致,但是优化后的取值都明显减小,IAHA 算法取值最小、性能最佳。

由表 1 可知,优化前网损为 2.810 MW,这情况不利于配电网长期运行。当配电网引入算法优化后,网损值明显降低。引入 PSO 算法后网损降为 1.230 MW,引入 SSA 算法后网损降为 1.192 MW,引入 AHA 算法后网损降为 1.155 MW,引入 IAHA 算法后网损降为 1.097 MW,且 PSO 算法优化后与优化前的电压偏移量对比,降低了 43.73%,SSA 算法优化后与优化前的电压偏移量对比,降低了 44.83%,AHA 算法优化后与优化前的电压偏移量对比,降低了 56.66%。在电压稳定性指标的约束范围内,电压稳定性指标数值越低证明此时系统越稳定。优化前的电压稳定性指标为 0.479,而经 PSO 算法、SSA 算法、AHA 算法和 IAHA 算法优化后的电压稳定性指标分别为 0.295,0.271,0.248,0.182。综上所述,IAHA 算法优化后对比 PSO 算法、SSA 算法和 AHA 算法,无论是在降低网损和电压偏移量还是提升电压稳定性方面,IAHA 算法表现更优异,寻优效果更好。

不同算法的适应度函数值对比如图 7 所示。由图 7 可知,PSO 算法、SSA 算法与 AHA 算法在迭代过程中容易陷入局部最优。而通过引入 Tent 映射以及非均匀变异策略的 IAHA 算法,则能够在迭代的后期阶段依然维持较高的种群多样性,从而展现出更强的全局搜索能力,并有效降低了陷入局部最优的风险。

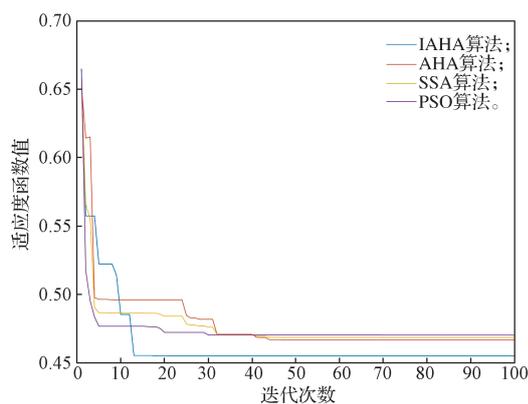


图 7 不同算法的适应度函数值对比图

Fig. 7 Comparison chart of fitness function values for different algorithms

图 8 为仿真系统中各设备的出力图和电容器投入组数图。由图 8 可以得知,经 IAHA 算法优化后,光伏、风电和 SVC 的无功出力以及电容器组投入组数都在约束范围内。

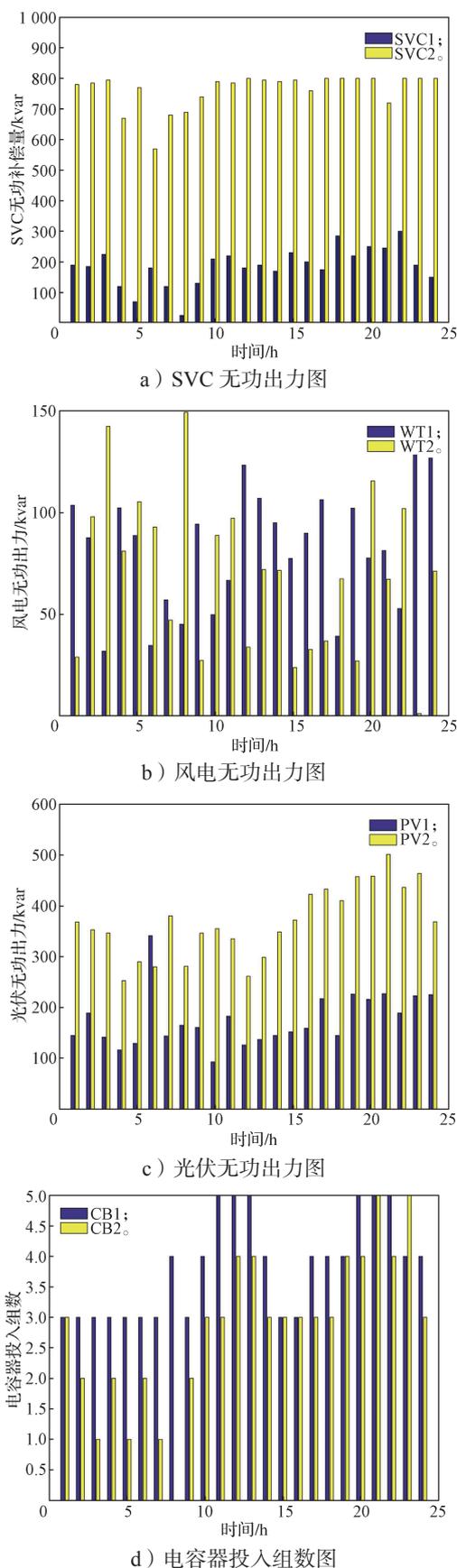


图 8 各设备出力图和电容器投入组数图

Fig. 8 Output diagram of individual device and the number of capacitor banks

5 结语

本文不仅考虑了光伏和风电的动态变化和电压稳定性指标,也考虑到了电容器组最大投入组数的约束,以及加入了 SVC 和电容器组对配电网进行无功补偿。通过电压稳定性指标评价配电网的稳定性,确保配电网稳定运行,并引入改进的人工蜂鸟算法对配电网进行主动无功优化,使得配电网得到高效无功优化,与 PSO 算法、SSA 算法和 AHA 算法对比,IAHA 算法拥有更低的网损和电压偏移量,并由仿真实验验证了本文方法对主动配电网无功优化的效果。

参考文献:

- [1] 马喜平,贾 嵘,梁 琛,等.高比例新能源接入下电力系统降损研究综述[J].电网技术,2022,46(11): 4305-4315.
MA Xiping, JIA Rong, LIANG Chen, et al. Review of Researches on Loss Reduction in Context of High Penetration of Renewable Power Generation[J]. Power System Technology, 2022, 46(11): 4305-4315.
- [2] 王 博,杨德友,蔡国伟.高比例新能源接入下电力系统惯量相关问题研究综述[J].电网技术,2020,44(8): 2998-3007.
WANG Bo, YANG Deyou, CAI Guowei. Review of Research on Power System Inertia Related Issues in the Context of High Penetration of Renewable Power Generation[J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 2998-3007.
- [3] 张 健,王凯悦.考虑电压稳定性的含分布式电源配电网多目标无功优化[J].电气技术,2020,21(3): 64-69.
ZHANG Jian, WANG Kaiyue. Multi-Objective Reactive Power Optimization in Distribution Network with Distributed Generation Considering Voltage Stability[J]. Electrical Engineering, 2020, 21(3): 64-69.
- [4] 魏 凯,程 静.基于 IRISO 算法的含分布式电源配电网重构[J].科学技术与工程,2024,24(3): 1075-1082.
WEI Kai, CHENG Jing. Distribution Network Reconfiguration with Distributed Generation Based on Improved Rat Swarm Optimization[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(3): 1075-1082.
- [5] 王 杰,王维庆,王海云,等.主动配电网中考虑条件风险价值的智能软开关的规划方法[J].电力系统保护与控制,2022,50(2): 1-11.
WANG Jie, WANG Weiqing, WANG Haiyun, et al. Planning Method of Soft Open Point for an Active Distribution Network Considering Conditional Value-at-Risk[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 1-11.
- [6] 陈国发,张文庆,刘 锋,等.基于改进蜂群算法的含 DG 配电网多目标无功优化[J].智慧电力,2019,47(3): 97-103.
CHEN Guofa, ZHANG Wenqing, LIU Feng, et al. Multi-Objective Reactive Power Optimization of Distribution Network with DG Based on Improved Bee Colony Algorithm[J]. Smart Power, 2019, 47(3): 97-103.
- [7] 史可鉴,李胜川,朱义东,等.考虑电压稳定性与分布式电源接入的低压配电网无功优化研究[J].江苏科技大学学报(自然科学版),2022,36(2): 80-85.
SHI Kejian, LI Shengchuan, ZHU Yidong, et al. Reactive Power Optimization of Low Voltage Distribution Systems with Distribution Generators Considering Voltage Stability[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 36(2): 80-85.
- [8] 陈 虹.含分布式电源的配电网无功补偿优化研究[J].信息技术,2020,44(11): 132-136.
CHEN Hong. Reactive Power Compensation Optimization of Distribution Network Including Distributed Power Supply[J]. Information Technology, 2020, 44(11): 132-136.
- [9] SINGH H, SAWLE Y, DIXIT S, et al. Optimization of Reactive Power Using Dragonfly Algorithm in DG Integrated Distribution System[J]. Electric Power Systems Research, 2023, 220: 109351.
- [10] LIAN L. Reactive Power Optimization Based on Adaptive Multi-Objective Optimization Artificial Immune Algorithm[J]. Ain Shams Engineering Journal, 2022, 13(5): 101677.
- [11] 夏正龙,陈 宇,陆良帅,等.基于多目标鲸鱼算法的配电网动态无功优化研究[J].河南师范大学学报(自然科学版),2025,53(1): 116-126.
XIA Zhenglong, CHEN Yu, LU Liangshuai, et al. Research on Dynamic Reactive Power Optimization of Distribution Network Based on Multi-Objective Whale Optimization Algorithm[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2025, 53(1): 116-126.
- [12] 周良才,周 毅,沈维健,等.基于深度强化学习的新型电力系统无功电压优化控制[J].电测与仪表,2024,61(9): 182-189.
ZHOU Liangcai, ZHOU Yi, SHEN Weijian, et al. Reactive Voltage Optimization Control of Novel Power System Based on Deep Reinforcement Learning[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(9): 182-189.
- [13] 冯 肯,杨 迪,肖 汉,等.基于改进 DE 的含风

- 电机组配电网多目标无功优化[J]. 四川电力技术, 2018, 41(6): 60-65.
- FENG Ken, YANG Di, XIAO Han, et al. Multi-Objective Reactive Power Optimization for Distribution Network with Wind Power Generators Based on Improved Differential Evolution[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2018, 41(6): 60-65.
- [14] MOGHAVVEMI M, FARUQUE M O. Power System Security and Voltage Collapse: A Line Outage Based Indicator for Prediction[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 1999, 21(6): 455-461.
- [15] MOGHAVVEMI M, FARUQUE M O. Technique for Assessment of Voltage Stability in Ill-Conditioned Radial Distribution Network[J]. IEEE Power Engineering Review, 2001, 21(1): 58-60.
- [16] 刘道伟, 谢小荣, 穆钢, 等. 基于同步相量测量的电力系统在线电压稳定指标[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(1): 13-17.
- LIU Daowei, XIE Xiaorong, MU Gang, et al. An On-Line Voltage Stability Index of Power System Based on Synchronized Phasor Measurement[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(1): 13-17.
- [17] 李国庆, 翟晓娟. 基于层次分析法的孤立微电网多目标优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(10): 17-23.
- LI Guoqing, ZHAI Xiaojuan. Multi-Objective Optimal Operation of Island Micro-Grid Based on Analytic Hierarchy Process[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(10): 17-23.
- [18] KANSAL V, DHILLON J S. Ameliorated Artificial Hummingbird Algorithm for Coordinated Wind-Solar-Thermal Generation Scheduling Problem in Multiobjective Framework[J]. Applied Energy, 2022, 326: 120031.
- [19] 刘辉. 基于改进遗传算法的电力系统无功优化研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2021.
- LIU Hui. Research on Reactive Power Optimization of Power System Based on Improved Genetic Algorithm[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2021.
- [20] 葛华辉. 集成AGV路径规划的数字化车间设备布局优化方法及其应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- GE Huahui. Integrated AGV Path Planning of Digital Workshop Equipment Layout Optimization Method and Its Applications[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [21] 陈倩, 王维庆, 王海云, 等. 含分布式电源的配电网动态无功补偿优化策略研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(1): 525-535.
- CHEN Qian, WANG Weiqing, WANG Haiyun, et al. Research on Dynamic Reactive Power Compensation Optimization Strategy of Distribution Network with Distributed Generation[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2023, 44(1): 525-535.
- [22] 卢子敬, 李子寿, 郭相国, 等. 基于多目标人工蜂鸟算法的电-氢混合储能系统最优配置[J]. 中国电力, 2023, 56(7): 33-42.
- LU Zijing, LI Zishou, GUO Xiangguo, et al. Optimal Configuration of Electricity-Hydrogen Hybrid Energy Storage System Based on Multi-Objective Artificial Hummingbird Algorithm[J]. Electric Power, 2023, 56(7): 33-42.

(责任编辑: 姜利民)