

基于小世界理论及改进蜣螂算法的分布式电源规划方法

张雨¹, 王德辉¹, 蔡文洋², 邹时容¹, 王嘉延¹, 谭海东³

(1. 广东电网有限责任公司广州供电局, 广州 510620; 2. 南方电网数字电网科技(广东)有限公司, 广州 510620; 3. 湖北工业大学电气与电子工程学院, 武汉 430068)

摘要: 针对分布式电源选址定容规划中求解维度高、离散与连续变量共存的问题, 提出了一种先确定备选位置, 再用启发式算法进行容量和位置优化的方法。首先, 依据有功损耗改善率、介数中心性及紧密中心性3个指标对节点进行筛选, 结合节点负荷情况对邻近节点进行合并, 形成备选节点集。随后, 构建了以最小化总有功损耗、电压稳定性和分布式电源总容量为目标的优化模型。为有效求解该模型, 提出了一种基于混沌映射、自适应权重和莱维飞行策略的改进蜣螂算法, 以优化备选节点中的分布式电源位置和容量。最后, 通过IEEE-33和IEEE-69节点系统的仿真验证表明, 所提方法在降低总有功损耗和节点电压偏差方面表现优异。

关键词: 分布式电源; 选址定容; 改进蜣螂算法; 多目标优化

Distributed Power Generation Planning Method Based on Small World Theory and Improved Dung Beetle Algorithm

ZHANG Yu¹, WANG Dehui¹, CAI Wenyang², ZOU Shirong¹, WANG Jiayan¹, TAN Haidong³

(1. Guangzhou Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510620, China; 2. Digital Grid Technology (Guangdong) Co., Ltd., CSG, Guangzhou 510620, China; 3. School of Electrical and Electronic Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: Aiming at the problem of high-dimensional solving and coexisting discrete and continuous variables in the site selection and capacity planning of distributed power generation, a method is proposed to first determine candidate locations and then a heuristic algorithm is used to optimize the capacity and location. Firstly, the nodes are screened according to the three indicators: active loss improvement rate, betweenness centrality and closeness centrality, and adjacent nodes are merged according to the node power load conditions to form a set of candidate nodes. Subsequently, an optimization model with the goal of minimizing total active loss, maximizing voltage stability, and minimizing total capacity of distributed power generation is constructed. In order to effectively solve the model, dung beetle algorithm is improved based on chaotic mapping, adaptive weights and Levy flight strategy to optimize the locations and capacities of distributed generation in the candidate nodes. Finally, simulation verifications on IEEE-33 and IEEE-69 node systems show that the proposed method performs well in reducing total active power loss and node voltage deviation.

Key words: distributed power generation; site selection and capacity planning; improved dung beetle algorithm; multi-objective optimization

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62473133); 中国南方电网有限责任公司科技项目(GZKJXM20222387)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (62473133); the Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (GZKJXM20222387).

0 引言

随着“双碳目标”的提出^[1-3],光伏、风电等分布式电源(distributed generation, DG)凭借占地少、清洁高效的优势在电网中的渗透率正逐步提升^[5-8]。2022年国家发改委发布《“十四五”现代能源体系规划》^[9],明确提出以电网为基础支撑分布式能源发展。然而,DG的接入位置与接入容量会直接影响配电网的电能量与运行稳定性,不合理的接入方案不仅会造成资金浪费,还会严重干扰电力系统的正常运行^[10-12]。因此,规划科学合理的分布式电源选址定容方案,对提升分布式电源利用率、保障配电网运行可靠性具有重要意义。

长期以来,国内外学者针对分布式电源(DG)的选址定容问题开展了大量研究,形成了构建多种优化模型与求解算法的研究思路。目前,现有研究多聚焦于建立选址定容优化模型后,采用多目标遗传算法等启发式算法完成求解^[13-14]。文献[15]在构建目标函数时,纳入了电压质量、网络损耗与投资成本3项因素,采用改进遗传算法求解该多目标优化问题。该方法在实际应用中提升了求解效率,但受固定参数设置的限制,算法在复杂网络结构下的适应性仍存在不足。文献[16]提出了融合遗传算法与花授粉算法的混合求解方法,旨在提升算法的全局寻优能力,然而该方法对初始种群的敏感性较高,易对求解稳定性造成影响。此外,文献[17]考虑气象条件的差异性,采用自适应蝠鲞觅食优化算法开展DG选址定容优化,并通过马氏距离进一步细化解集。该方法可以在不同气候条件下保持较高的鲁棒性,但在大规模配电网场景中存在求解时间过长的问題。

尽管现有研究已提出了多种行之有效的算法与模型,但目前在进行DG选址时,大多将系统内全部节点列为可选位置,导致求解空间过大,尤其在节点数量较多、网络结构复杂的配电网场景中,求解难度会显著提升。

针对这一问题,部分学者提出了节点筛选方法来降低求解维度:文献[18]采用线损灵敏度系数法筛选合适的DG接入节点,再结合非支配排序粒子群算法完成求解。该方法虽然能够减少备选节点的数量,但仅考虑线损单一因素,很可能会遗漏部分更优的DG接入点。文献[19]则综合电压稳定指

数、损耗灵敏度和平均辐射量3个指标,通过加权方式评估节点,筛选出适合分布式电源接入的备选节点。

然而从配电网整体视角分析,该方法仍存在改进空间:尽管它在节点评估阶段引入了多个指标,但并未充分考虑配电网整体拓扑结构的差异,以及各节点在能量传输过程中发挥的不同作用。

对于DG选址定容问题,优化过程中需同时处理节点是否接入DG的0-1离散变量与接入容量的连续变量。这种复杂变量结构使得传统优化算法易陷入局部最优解,难以有效探索全局最优解,需对优化算法做出改进以提升其全局搜索能力。

针对上述问题,本文首先计算不同节点接入分布式电源(DG)后的有功损耗改善率,筛选出在降低网损方面表现更优的节点;随后基于小世界理论,采用介数中心性和紧密中心性两项指标评估节点在配电网中的重要程度,同时结合负荷水平与位置邻近关系对节点集合进行增补与删减,最终得到DG的备选接入节点。在此基础上,本文提出一种改进蛭螂优化算法,以总有功损耗、电压稳定性和DG总容量作为目标函数,实现DG接入位置与容量的协同优化。算例仿真结果表明,本文提出的规划方法能够有效降低求解维度,完成DG的合理配置,最终实现降低系统网损、改善节点电压分布的效果。

1 分布式电源备选节点的确定

本文首先从DG接入节点对配电网有功网损的改善效果、以及节点在配电网中的重要性两个维度出发,确定DG备选节点的安装位置。

本文针对配电网的不同节点,依次接入容量为节点负荷30%的DG并开展潮流计算,得到每个节点单独接入DG后配电网的总有功网损。为此本文定义有功损耗改善率 η_i ,用以量化DG接入对配电网有功网损的改善程度,其表达式如下。

$$\eta_i = \frac{P_{Gi}}{P_{G0}} \quad (1)$$

式中 P_{G0} 和 P_{Gi} 分别为配电网原始总有功网损和第 i 个节点接入DG后的总有功网损。 η_i 的值越小,在该节点接入DG对有功网损的改善效果越好。

1998年Watts和Strogatz提出了小世界网络概念^[20],具体而言,该类网络同时具备较短的平均路

径长度与较高的聚类系数。这一理论最初应用于社会网络研究,后续研究者在诸多复杂系统中都发现了小世界特性,电力系统也不例外:文献[21]以中美两国多个典型电网为例展开分析,结果表明绝大多数电网都属于小世界网络。

结合小世界网络的特性可以对分布式电源(DG)的接入节点进行优化,确保电能以最小损耗、最短路径高效传输至负荷中心。小世界网络的短路径特性,让电能可以在复杂的电网拓扑中快速高效传输,显著提升了分布式电源DG的输送效率;其高聚类特性则会促进形成紧密的局部连接,有助于搭建区域性电力调度机制,使得DG接入后可优先在本区域内完成电力分配,进而减少长距离传输过程中的电能损耗。

本文通过介数中心性与紧密中心性对配电网节点的短路径特性与高聚类特性开展量化分析。其中介数中心性用于衡量节点作为网络中不同节点间最短路径中介的频率,能够反映该节点是否为能量传递枢纽;紧密中心性则用于评估节点与其他节点的平均最短路径距离,可反映该节点在网络中的连接能力。

介数中心性的表达式为:

$$C_B(i) = \sum_{s \neq v \neq t} \frac{\sigma_{st}(i)}{\sigma_{st}} \quad (2)$$

式中: $C_B(i)$ 为节点的 i 介数中心性; s 和 t 分别为配电网中任意两个不同的节点; σ_{st} 为节点 s 和节点 t 之间所有最短路径的数量; $\sigma_{st}(i)$ 为节点 s 和节点 t 之间经过节点 i 的最短路径的数量。

紧密中心性的表达式为:

$$C_c(i) = \frac{1}{\sum_{k \neq i} d(i, k)} \quad (3)$$

式中: $C_c(i)$ 为节点 i 的紧密中心性; k 为网络中的其他节点; $d(i, k)$ 为节点 i 到节点 k 的最短路径距离。

由式(2)~(3)可知,高介数中心性的节点充当关键枢纽,确保网络的连通性并优化能量传输路径;而高紧密中心性的节点位于电网核心,具备快速连接全网的能力,从而显著提升能量传递的效率和响应速度。这一分析为优化分布式电源接入和电力调度提供了理论基础,有助于构建更加高效、可靠的配电网。

基于上述理论,本文进一步结合节点负荷水平和邻近关系,提出一种具有普适性的DG备选节点确定方法,具体步骤如下。

步骤1: 将配电网中的所有节点按照有功损耗改善率 η 升序排序,根据配电网的实际规模选取一定比例的节点,一般取前 50 %;

步骤2: 在步骤1选取的节点中,计算节点的介数中心性和紧密中心性,并将两项指标分别按降序排序,各取前 50%,然后取并集进行筛选;

步骤3: 在步骤2的备选节点基础上,增补负荷占配电网总负荷比例较高的节点;

步骤4: 考虑到DG接入对邻近负荷节点的影响,DG布局不宜过度集中。因此,对于备选节点中的相邻节点,仅选择 η 值较低的节点;

步骤5: 检查配电网中的所有支路是否都有备选节点。对于没有DG备选节点的支路,计算该支路负荷占总负荷的比例,若比例超过拟接入DG数量的倒数,则增补支路中 η 值最小的节点。

2 分布式电源选址定容模型建立

2.1 目标函数

分布式电源的合理配置能够有效降低有功网络损耗,提高配电网能量传输效率。以分布式电源接入后配电网总有功功率损耗 P_{Loss} 为目标,其数学模型为:

$$P_{Loss} = \sum_{j=1}^{n_1} I_j^2 R_j \quad (4)$$

式中: n_1 为配电网中总支路数量; I_j 为第 j 条支路的电流; R_j 为第 j 条支路的电阻。

牛顿-拉夫逊法是进行潮流计算的常用方法之一,其关键步骤是求解如式(5)所示的矩阵方程。

$$\begin{bmatrix} J_{PT} & J_{PV} \\ J_{QT} & J_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: J_{PT} 和 J_{PV} 分别为有功功率对电压相角和电压幅值的偏导数矩阵; J_{QT} 和 J_{QV} 分别为有功功率对电压相角和电压幅值的偏导数矩阵; $\Delta\theta$ 和 ΔV 分别为相角和电压变化的相量; ΔP 和 ΔQ 分别为节点有功功率和无功功率不平衡相量。

为了消除相角变化量,仅研究电压稳定性与节点功率的关系,现对雅可比矩阵进行简化。

首先由式(5)中的矩阵方程解出 $\Delta\theta$ 。

$$\Delta\theta = (J_{PT})^{-1}(\Delta P - J_{PV}\Delta V) \quad (6)$$

将式(6)代入 $J_{QT}\Delta\theta + J_{QV}\Delta V = \Delta Q$ 并消去 $\Delta\theta$, 可得:

$$(J_{QV} - J_{QT}(J_{PT})^{-1}J_{PV})\Delta V = \Delta Q - J_{QT}(J_{PT})^{-1}\Delta P \quad (7)$$

故而, 简化后的雅可比矩阵 J_R 可以表示为:

$$J_R = J_{QV} - J_{QT}(J_{PT})^{-1}J_{PV} \quad (8)$$

基于式(8), 本文构建了结合特征值信息和节点功率变化的电压稳定性指标 f_2 以反映配电网在不同DG接入情形下的电压稳定性。

$$f_2 = \max\left(\frac{1}{\lambda_{J_R}}\right) \times \max(|\Delta Q|) \quad (9)$$

式中: λ_{J_R} 为简化雅各比矩阵 J_R 的特征值; $|\Delta Q|$ 为节点的无功不平衡量的绝对值。

特征值分析可用于评估系统的稳定性, 特征值倒数较大表明系统接近不稳定状态, 故 f_2 的值越小配电网的电压稳定性越好。

分布式电源的成本与其容量密切相关, 大容量分布式电源通常需要更高规格的电缆、变压器、逆变器等设备, 同时维护与运行费用也会更高。从降低配电网建设和运行成本的角度考虑, 将配电网中的分布式电源的总容量作为目标 f_3 , 其表达式为:

$$f_3 = \sum_{i=1}^{n_2} S_{DG,i} \quad (10)$$

式中: n_2 为配电网中节点数量; $S_{DG,i}$ 为节点 i 的分布式电源容量。

2.2 约束条件

上述目标函数应满足以下约束条件。

1) 配电网中所有节点都应保持功率平衡, 满足式(11)所示的约束条件。

$$\begin{cases} P_i - U_i \sum_{k=1}^N U_k (G_{i,k} \cos \theta_{i,k} + B_{i,k} \sin \theta_{i,k}) = 0 \\ Q_i - U_i \sum_{k=1}^N U_k (G_{i,k} \sin \theta_{i,k} - B_{i,k} \cos \theta_{i,k}) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中: P_i 和 Q_i 分别为节点 i 的有功注入功率和无功注入功率; U_i 为节点 i 的电压幅值; N 为与节点 i 直接相连的节点数量; k 为与节点 i 直接相连的节点; $G_{i,k}$ 、 $B_{i,k}$ 和 $\theta_{i,k}$ 分别为节点 i 和 k 之间的电导、电纳和相角差。

2) 为保证配电网安全运行, 节点电压应满足如下约束条件。

$$U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max}, i = 1, 2, \dots, n_2 \quad (12)$$

式中: n_2 为配电网中总节点数量; $U_{\max}$ 和 $U_{\min}$ 分别

为节点 i 处的电压上下限。

3) 单台分布式电源容量约束:

$$0 \leq S_{DG,i} \leq S_{DG,\max} \quad (13)$$

式中: $S_{DG,i}$ 为节点 i 的分布式电源容量; $S_{DG,\max}$ 为单台分布式电源的最大容量。

4) 分布式电源总装机容量不应超过配电网的预先设计值, 有如下约束。

$$\sum_{i=1}^n S_{DG,i} \leq \varepsilon P_{\text{AllLoad}} \quad (14)$$

式中: ε 为配电网设定的新能源渗透率; P_{AllLoad} 为配电网中总有功负荷; n 为节点数量。

3 分布式电源选址定容模型求解

3.1 蜣螂优化算法

蜣螂优化(dung beetle optimizer, DBO)算法是由沈波教授团队提出的一种新型启发式算法, 主要模拟了蜣螂在自然界中的一些行为^[22]。文献[22]重点关注了滚球、繁殖、觅食和窃取4类行为, 并给出了DBO算法的理论依据。

滚球蜣螂会根据外界环境因素, 在全局搜索空间内随机选取一个方向并直线前进。没有障碍物时蜣螂位置更新的表达式为:

$$\begin{cases} x_i(t+1) = x_i(t) + a \cdot k \cdot x_i(t-1) + b \cdot \Delta x \\ \Delta x = |x_i(t) - X^w| \end{cases} \quad (15)$$

式中: t 为迭代数量; $x_i(t)$ 为第 i 个蜣螂在第 t 次迭代时的位置; k 和 b 为权重值, $k \in (0, 0.2]$, $b \in (0, 1)$; a 为状态变量, 取1时表示位置无偏离, 取-1时表示位置发生偏离; X^w 为全局最差位置; Δx 为模拟外部环境的变化量。

当遇到障碍物时蜣螂会选择跳舞来寻找最优位置的方向信息, 故可采用正切函数来模拟舞蹈行为来确定新的前进方向。有障碍物的情况下蜣螂位置更新的表达式为:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + \tan(\theta) |x_i(t) - x_i(t-1)| \quad (16)$$

式中: θ 为蜣螂的转向角度且 $\theta \in [0, \pi]$ 中的一个随机值, 当 θ 为 0 、 $\pi/2$ 、 π 时, 蜣螂的位置不变。

蜣螂在繁殖过程中会将粪球滚到一个安全区, 为后代提供一个更优的出生环境。繁殖区域的边界更新公式为:

$$\begin{cases} L_b^* = \max(X^* \times (1 - R), L_b) \\ U_b^* = \min(X^* \times (1 + R), U_b) \end{cases} \quad (17)$$

式中: X^* 为当前局部最优位置; U_b 、 L_b 分别为待优化变量的上、下边界; U_b^* 、 L_b^* 分别为更新后的上、下边界; $R = 1 - t/t_{\max}$ 为一个惯性权值变量, 与迭代次数有关; $t_{\max}$ 为设定的最大迭代次数。

在繁殖区雌性蜣螂每次迭代会生成一颗新的卵, 每次迭代繁殖区域也会动态更新, 繁殖球位置更新的表达式为:

$$B_i(t+1) = X^* + b_1 \times (B_i(t) - L_b^*) + b_2 \times (B_i(t) - U_b^*) \quad (18)$$

式中: $B_i(t)$ 为第 t 次迭代后繁殖球的位置; b_1 和 b_2 为两个 D 维行向量; D 为待求解模型中决策变量的数量。

小蜣螂孵化会自行开始觅食, 觅食区边界条件为:

$$\begin{cases} L_b^f = \max(X_g \times (1 - R), L_b) \\ U_b^f = \min(X_g \times (1 + R), U_b) \end{cases} \quad (19)$$

式中: U_b^f 、 L_b^f 分别表为觅食区的上、下边界; X_g 为全局最优位置; 其余变量定义参照式(17)。

小蜣螂位置更新的表达式为:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + C_1 \times (x_i(t) - L_b^f) + C_2 \times (x_i(t) - U_b^f) \quad (20)$$

式中: $x_i(t)$ 为第 i 个小蜣螂在第 t 次迭代时的位置; C_1 为一个正态分布随机数; C_2 为一个 0 到 1 的随机变量。

在蜣螂群体中还有一部分窃取者, 它们会偷走其余蜣螂的食物, 其位置更新的表达式为:

$$x_i(t+1) = X_{\text{global}} + S \times g \times (|x_i(t) - X^*| + |x_i(t) - X^b|) \quad (21)$$

式中: $x_i(t)$ 为第 i 个窃取者在第 t 次迭代时的位置; g 为一个满足正态分布的 $1 \times D$ 随机向量; S 为一个固定值。由于偷窃者的目标是最佳食物, 其位置不断更新会最终得到全局最优位置 X_{global} ; X^b 为边界位置。

3.2 多策略(2)改进的蜣螂算法

原始 DBO 算法结构简单、收敛速度快, 全局搜索能力较差, 容易陷入局部最优解。针对这一不足, 本文采用 Tent 映射初始化种群, 并在位置更新过程中引入自适应权重与 Levy 飞行策略, 从而提高算法的收敛速度和全局搜索能力。

3.2.1 Tent 映射

初始种群的分布情况与求解算法的性能密切相关。初始种群在解空间中的分布越均匀, 算法的寻

优效率越高, 但原始 DBO 算法的初始种群是随机生成的, 无法保证均匀性。混沌映射是一种常用的优化方式, Tent 映射相较于其他映射产生的序列更加均匀^[23], 因此, 采用 Tent 映射对蜣螂种群进行初始化。Tent 映射的公式为:

$$y_{r+1} = \begin{cases} y_r/\alpha, & 0 \leq y_r < \alpha \\ (1 - y_r)/(1 - \alpha), & \alpha \leq y_r \leq 1 \end{cases} \quad (22)$$

式中: y_r 为生成的混沌序列; r 为种群数量; α 为映射的扩张系数, 其取值范围为区间, 本文选用 0.49。

基于 Tent 映射, 种群位置 X 的表达式为:

$$X = L_b + (U_b - L_b) \times y_r \quad (23)$$

3.2.2 自适应权重

在 DBO 算法中, 滚球蜣螂位置的更新受到权重 b 的取值影响较大。文献[20]中的 b 为一固定值 0.3, 现将 b 修改为随迭代次数变化的变量, 其表达式为:

$$b_t = b_{\max} - \frac{(b_{\max} - b_{\min})t}{t_{\max}} \quad (24)$$

式中: $b_{\max}$ 和 $b_{\min}$ 分别为 b 的最大值和最小值; t 为当前迭代次数; $t_{\max}$ 为设定的最大迭代次数。

将 b_t 代入式(15)可得到新的滚球蜣螂位置更新公式。

$$\begin{cases} x_i(t+1) = x_i(t) + akx_i(t-1) + \\ \quad (b_{\max} - \frac{(b_{\max} - b_{\min})t}{t_{\max}})\Delta x \\ \Delta x = |x_i(t) - X^w| \end{cases} \quad (25)$$

由式(25)可知, 在迭代初期滚球蜣螂位置更新步长较大, 随着迭代次数的增加, 滚球蜣螂位置更新步长逐渐减小。自适应权重的优势在于能够较好地平衡全局与局部搜索能力, 提高选址定容模型求解的精度。

3.2.3 Levy 飞行策略

在蜣螂群体中窃取者的表达式中, 窃取者会根据当前局部最优位置 X^* 更新位置, 如果算法已经陷入局部最优解, 就会处于停滞状态。故本文引入 Levy 飞行策略对窃取者的位置进行更新, 使部分窃取者的搜索空间得到拓展^[24]。

Levy 飞行策略 $Levy(\beta)$ 的计算公式如下。

$$Levy(\beta) = \frac{\mu}{|\epsilon|^{\frac{1}{\beta}}} \quad (26)$$

式中: $\beta \in [0, 2]$; μ 为方向变量, 且服从 $N(0, \sigma^2)$ 分布; ι 也为方向变量, 且服从 $N(0, 1)$ 分布。

$$\sigma = \left\{ \frac{\Gamma(1+\beta) \sin\left(\frac{\pi\beta}{2}\right)}{\beta \Gamma\left(\frac{1+\beta}{2}\right) \cdot 2^{\frac{\beta-1}{2}}} \right\}^{\frac{1}{\beta}} \quad (27)$$

式中 $\Gamma(x) = (x-1)!$ 。

由上述公式可得采用 Levy 飞行策略后的窃取者位置表达式为:

$$x_i(t+1) = \text{Levy}(\beta) X_g + S \times g(|x_i(t) - X^*| + |x_i(t) - X^b|) \quad (28)$$

3.3 算法改进效果验证

本文采用 MATLAB 对部分 CEC 标准测试函数进行仿真实验, 具体函数列于表 1。实验中将最大迭代次数统一设定为 400, 种群规模为 30, 维度为 30。图 1 展示了 IDBO 算法与原始 DBO 算法的对比结果。

表 1 测试函数
Tab. 1 Test functions

表达式	维度	取值范围	最优值
$f_1(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2$	30	$[-100, 100]$	0
$f_4(x) = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^i x_j \right)^2$	30	$[-100, 100]$	0
$f_9(x) = \sum_{i=1}^n [x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) + 10]$	30	$[-5, 12.5, 12]$	0
$f_{11}(x) = \frac{1}{4000} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \prod_{i=1}^n \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right) + 1$	30	$[-600, 600]$	0

由图 1 可知, 对于单峰测试函数 f_1 、 f_4 , IDBO 算法的收敛速度更快, 接近线性下降, 没有出现停滞现象; 对于多峰测试函数 f_9 、 f_{11} , IDBO 算法的收敛速度更快, 迭代次数更少。因此, 本文提出的 IDBO 算法相较于原始的 DBO 算法具有更好的收敛性, 且全局搜索能力更强。

3.4 模型求解过程

利用第 1 节中的方法确定 DG 接入的备选节点后, 结合已确立的目标函数和约束条件, 采用 IDBO 算法对 DG 接入容量和位置进行优化求解, 具体求解流程如图 2 所示。第 2 节中的选址定容模型可概括为:

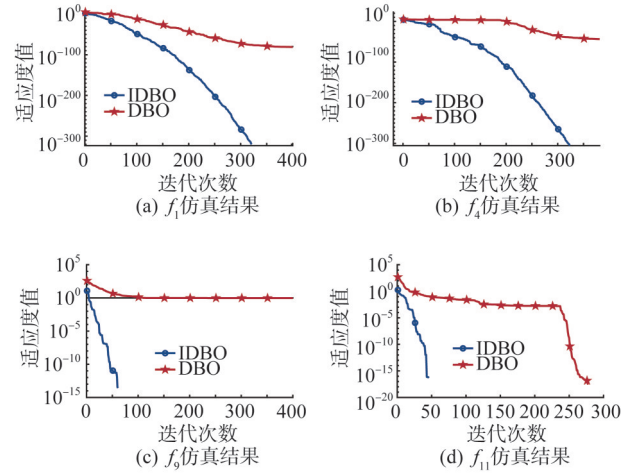


图 1 IDBO 与 DBO 寻优效果对比曲线

Fig. 1 Comparison curve of IDBO and DBO optimization effect

$$\begin{aligned} \min F &= [f_1; f_2; f_3] \\ \text{s.t.} \quad &\begin{cases} g(X) \leq 0 \\ h(X) = 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (29)$$

式中: $g(X)$ 为不等式约束; $h(X)$ 为等式约束;

本文通过一次罚函数 $P(X)$ 将约束条件和目标函数矩阵结合构建适应度函数 $A(X)$:

$$A(X) = F(X) + P(X) \quad (30)$$

式中: $P(X) = \sigma \sum \max(0, g(X)) + \sigma \sum |h(X)|$; σ 为惩罚因子, 本文的取值为 100。

通过引入罚函数, 将原有带约束优化问题转化为无约束优化问题。随后, 采用非支配排序来确定解之间的支配关系, 并通过拥挤度计算评估解的多样性, 从而确定最终的最优解集。在最优解集中将各目标归一化求和并按升序排列, 将和最小的解作为折衷解输出。

4 算例验证

4.1 算例参数

为验证本文所提方法的有效性, 选择如图 3 所示的 IEEE 33 节点系统进行分布式电源位置与容量规划。

图 3 中圆圈数字代表支路编号, 黑色数字为节点编号。该配电网系统共有 33 个节点, 32 条支路, 基准电压为 12.66 kV, 基准容量为 10 MVA。系统有功负荷大小为 3 715 kW, 无功负荷的大小为 2 300 kvar。本文拟接入分布式电源的容量范围为 0~2 MW, 功率因数设定为 0.9, 节点处电压上下

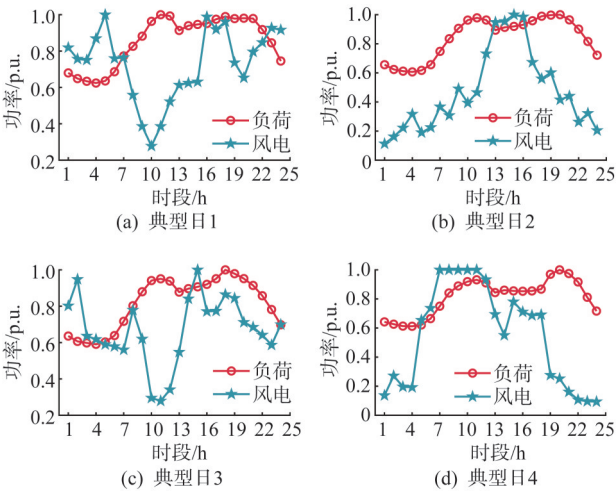


图5 典型日负荷及风电数据
Fig. 5 Typical daily load and wind power data

表2 典型日代表情况
Tab. 2 Typical day representations

典型日	代表天数	概率
1	173	0.473 9
2	22	0.060 3
3	115	0.315 1
4	55	0.150 7

表3 备选节点的优化效果
Tab. 3 Optimization effects of the alternative nodes

节点类型	10次求解所需的平均时间/s
确定备选节点	43.74
未确定备选节点方案	49.83

电源(DG)备选节点,确实能够有效降低求解维度并减少选址定容模型的求解时间。

为验证 IDBO 算法在分布式电源选址定容中的优势,本文将其与 DBO 算法、遗传算法(genetic algorithm, GA)展开对比。为保证对比公平性,3 种算法的最大迭代次数统一设置为 250 次,种群数量统一设置为 80,拟接入分布式电源数量为 4 个。

针对启发式算法的求解结果存在随机性的问题,本文开展了 10 次独立求解,统计得到出现频率最高的 4 个接入位置,并将 10 次求解得到的容量结果平均值作为最终接入容量。

图 6 为 IDBO、DBO 与 GA 这 3 种算法下的 IEEE-33 配电网在 4 个典型日下的平均节点电压分布。

由图 6 可知,3 种优化算法均能有效改善配电网的节点电压分布。其中,本文提出的 IDBO 算法

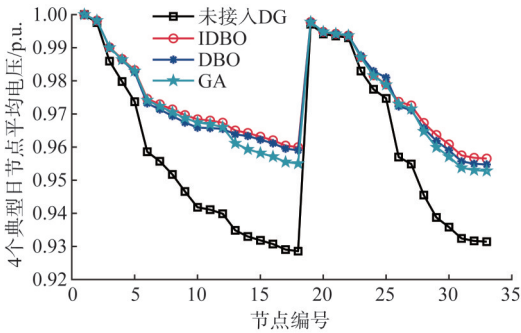


图6 4个典型日下平均节点电压分布
Fig. 6 Average node voltage distribution for four typical days

在节点电压偏差方面表现最优,特别是在改善 15—18 及 30—33 等支路末端节点电压方面,效果显著优于另外两种算法。

IDBO、DBO 和 GA 这 3 种算法下的分布式电源接入位置及装机容量如表 4 所示。

表4 分布式电源接入位置及容量
Tab. 4 Distributed power source access locations and capacities

算法	接入位置(装机容量/kW)			
IDBO	8(90.6)	10(318.6)	14(347)	29(728.6)
DBO	12(175.6)	14(438.5)	25(187.5)	29(691.1)
GA	6(343.6)	10(473.6)	12(188.1)	29(448.4)

IDBO 算法求解的 DG 接入总容量为 1 484.8 kW, DBO 算法求解出的 DG 接入总容量为 1 492.7 kW, GA 为 1 453.7 kW。3 种算法下配电网各典型日节点电压总偏差和各典型日总有功损耗分别如图 7—8 所示。

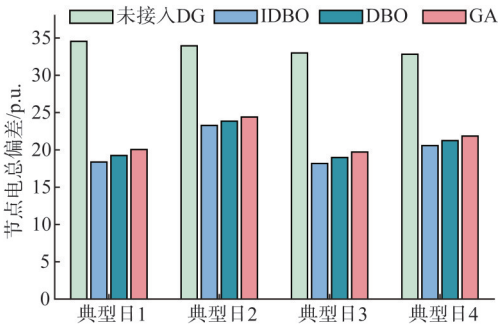


图7 不同算法下各典型日节点电压总偏差
Fig. 7 Total deviation of node voltage for each typical day under different algorithms

由图 7—8 可知, IDBO 算法得到的 DG 选址定容方案,在各典型日的节点电压总偏差与配电网总有功损耗均为最低。IDBO 算法优化后配电网 4 个

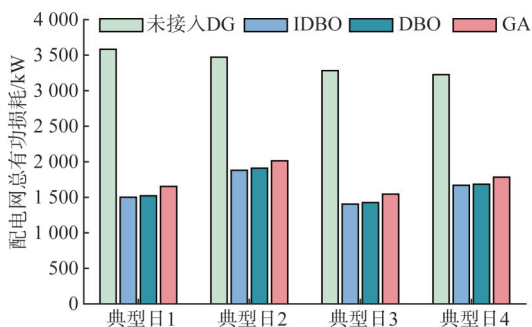


图8 不同算法下各典型日配电网总有功损耗

Fig. 8 Total active power loss of distribution network for each typical day under different algorithms

典型日的总有功损耗为 6 452.78 kW，节点电压总偏差为 80.4 p.u.；对比未接入 DG 时配电网 4 个典型日总有功损耗 13 563.23 kW、节点电压总偏差 134.31 p.u.，IDBO 优化后的总有功损耗和节点电压总偏差分别下降了 52.42 % 和 40.14 %。

DBO 算法优化后，配电网 4 个典型日的总有功损耗为 6 538.97 kW，节点电压总偏差为 83.3 p.u.；GA 算法优化后配电网 4 个典型日的总有功损耗为 6 993.98 kW，节点电压总偏差为 86.03 p.u.。

DBO 算法所得方案不仅有功损耗更高，接入的分布式电源总容量也高于 IDBO 算法所得方案；GA 算法确定的分布式电源规划方案虽然接入的分布式电源总容量最低，但其电压偏差和配电网有功损耗均为三者最高。上述结果表明，在解决分布式电源选址定容问题时，IDBO 算法的效果明显优于 DBO 算法和 GA 算法。

为进一步验证本文所提 DG 选址定容方法的有效性，本文还对接入 DG 数量为 6 的情形进行了研究，具体的 DG 规划方案如表 5 所示，DG 接入总容量为 1 517.8 kW。

表5 接入数量为6的DG规划方案

Tab. 5 DG planning scheme with 6 access points

参数	DG 接入位置及容量/kW					
节点	8	10	12	14	27	29
容量	119.3	151.8	234.5	291.4	183.6	573.2

采用表 5 中的 DG 规划方案后配电网节点电压分布如图 9 所示。

由图 9 可知，接入 6 个 DG 时的最优规划方案节点电压偏差略低于接入 4 个 DG 时的最优规划方案。接入 DG 数量为 6 时配电网在 4 个典型日内的总有功功率损

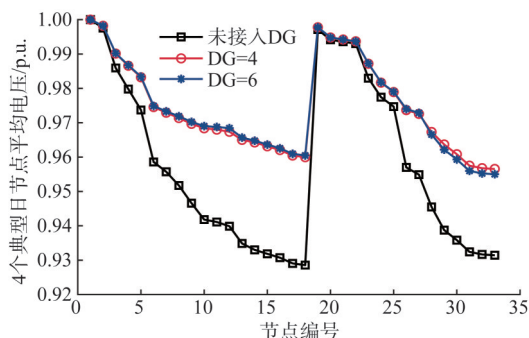


图9 不同DG接入数量时4个典型日下平均节点电压分布

Fig. 9 Average node voltages distribution for four typical days with different DG access numbers

耗为 6 492.78 kW，节点电压总偏差为 80.36 p.u.。

接入 6 个 DG 时各典型日节点电压总偏差和配电网总有功损耗情况如图 10 所示。

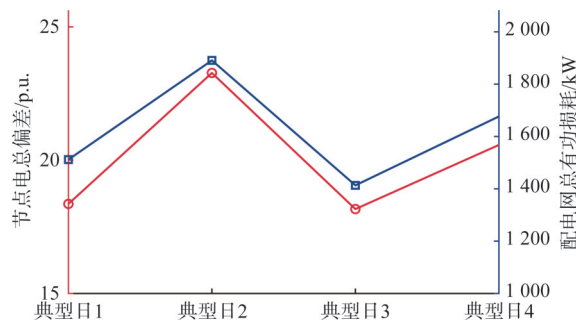


图10 接入6个DG时节点电压偏差与配电网总有功损耗

Fig. 10 Node voltage deviation and total active power losses of distribution network with 6 DGs connected

为验证本文所提 DG 选址定容方法在其他配电网系统中的适用性，本文在 IEEE-69 节点系统上进行了进一步的仿真验证，其主要参数参见文献[25]。

依据第 1 节提出的 DG 备选节点确定方法，可得 IEEE-69 节点系统的 DG 候选节点编号为 3、5、7、9、11、13、15、17、49、51、60 和 62，共 12 个候选位置。确定备选节点后对 IEEE-69 节点配电网的 DG 选址与定容问题进行求解，并记录了 10 次求解的平均耗时，结果如表 6 所示：本模型的平均求解时间为 63.92 s，相较于直接求解方法，时间消耗降低了 19.3 %。

表6 IEEE-69筛选节点的优化效果

Tab. 6 Optimization effect of IEEE-69 screening nodes

节点类别	10次平均求解时间/s
确定备选节点	63.32
未确定备选节点	78.43

IDBO 和 DBO 两种算法下的 DG 规划方案分别如表 7—8 所示。

表 7 IEEE-69 系统 IDBO 算法 DG 规划方案

Tab. 7 DG planning scheme of IDBO algorithm for IEEE-69 system

参数	DG 接入位置及容量/kW					
节点	8	10	12	14	27	29
容量	119.3	151.8	234.5	291.4	183.6	573.2

表 8 IEEE-69 节点系统 DBO 算法 DG 规划方案

Tab. 8 DG planning scheme of DBO algorithm for IEEE-69 node system

参数	DG 接入位置及容量/kW					
节点	8	10	12	14	27	29
容量	119.3	151.8	234.5	291.4	183.6	573.2

图 11 为 IDBO 和 DBO 算法下 IEEE-69 配电网在 4 个典型日的平均节点电压分布。

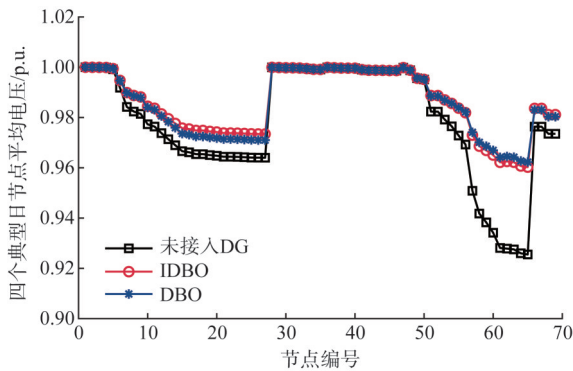


图 11 IEEE-69 系统 4 个典型日平均节点电压分布

Fig. 11 Average node voltage distribution of IEEE-69 node system on four typical days

针对 IEEE-69 系统经 IDBO 算法优化所得的 DG 规划方案, 在 4 个典型日内配电网的总有功损耗为 6 227.45 kW, 节点电压总偏差为 92.4 p.u.; 相较于未接入 DG 时 4 个典型日内的总有功损耗 15 006.3 kW, 节点电压总偏差 145.1 p.u., IDBO 算法下总有功损耗和节点电压总偏差分别分别下降了 58.5 % 和 36.32 %。

5 结论

本文针对分布式电源选址和定容问题进行了分析, 提出了一种创新方法, 主要贡献如下。

1) 基于小世界理论, 从配电网整体出发, 综合考虑有功损耗改善率、介数稳定性和紧密中心等

指标, 提出了一种通用的备选节点确定方法。这一方法有效降低了求解维度, 缩短了程序运行时间。

2) 提出了一种基于 Tent 映射、自适应权重和 Levy 飞行策略的改进蜣螂算法。该算法在标准测试函数上展现了优越的收敛性和全局搜索能力, 在分布式电源位置及容量确定问题中表现显著优于传统的 DBO 和 GA 算法。

未来的研究将进一步深入探讨不同节点之间的资源差异以及分布式电源建设的经济效益, 以更好地贴合配电网的实际需求。

参考文献

[1] 付红军, 孙冉, 王建波, 等. “双碳”背景下受端电网火电机组增加调相功能关键技术[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(14): 132 – 143.
FU Hongjun, SUN Ran, WANG Jianbo, et al. Key technologies of adding a condenser function in thermal power units in the receiving end power grid given a background of carbon peak and neutrality [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(14): 132 – 143.

[2] 李璐, 张泽端, 毕贵红, 等. “双碳”目标下基于系统动力学的发电行业碳减排政策研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(12): 69 – 81.
LI Lu, ZHANG Zeduan, BI Guihong, et al. Carbon emission reduction policy in the power generation sector based on system dynamics with “dual carbon” targets [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(12): 69 – 81.

[3] 喻磊, 王扬, 林心昊, 等. 基于膝点驱动的低碳工业综合能源系统多目标运行策略[J]. 南方电网技术, 2026, 20(4): 88 – 96.
YU Lei, WANG Yang, LIN Xinhao, et al. Multi-objective operation strategy for low carbon industrial integrated energy system based on knee point-driven[J]. Southern Power System Technology, 2026, 20(4): 88 – 96.

[4] 胡博, 谢开贵, 邵常政, 等. 双碳目标下新型电力系统风险评估: 特征、指标及评估方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(5): 1 – 15.
HU Bo, XIE Kaigui, SHAO Changzheng, et al. Commentary on risk of new power system under goals of carbon emission peak and carbon neutrality: characteristics, indices and assessment methods [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(5): 1 – 15.

[5] 任大伟, 肖晋宇, 侯金鸣, 等. 双碳目标下我国新型电力系统的构建与演变研究[J]. 电网技术, 2022, 46(10): 3831 – 3839.
REN Dawei, XIAO Jinyu, HOU Jinming, et al. Construction and evolution of China’s new power system under dual carbon goal [J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 3831 – 3839.

[6] 张沛, 刘晓菲, 李文云, 等. 基于图卷积网络的新型电力系统实时无功功率优化[J]. 南方电网技术, 2025, 19(7): 3 – 14.
ZHANG Pei, LIU Xiaofei, LI Wenyun, et al. Real-time reactive power optimization for new power systems based on graph convolutional networks [J]. Southern Power System Technol-

- ogy, 2025, 19(7): 3 – 14.
- [7] 王大为, 金渊, 张倩, 等. 面向新型电力系统的换电站聚合调控技术研究[J]. 高压电器, 2025, 61(11): 71 – 83.
WANG Dawei, JIN Yuan, ZHANG Qian, et al. Research on aggregated control technology of battery swap station for new power system[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(11): 71 – 83.
- [8] 彭思敏, 李允博, 康童, 等. 含逆变型分布式电源的配电网自适应电流保护方案[J]. 高压电器, 2026, 62(2): 214 – 222.
PENG Simin, LI Yunbo, KANG Tong, et al. Adaptive current protection scheme for distribution network with inverted interfaced distributed power generator [J]. High Voltage Apparatus, 2026, 62(2): 214 – 222.
- [9] 国家发展改革委、国家能源局. “十四五”现代能源体系规划[R]. 北京: 国家发展改革, 2022.
- [10] 丁明, 方慧, 毕锐, 等. 基于集群划分的配电网分布式光伏与储能选址定容规划[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(8): 2187 – 2201.
DING Ming, FANG Hui, BI Rui, et al. Optimal siting and sizing of distributed PV-storage in distribution network based on cluster partition[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(8): 2187 – 2201.
- [11] 刘蕊, 吴奎华, 冯亮, 等. 含高渗透率分布式光伏的主动配电网电压分区协调优化控制[J]. 太阳能学报, 2022, 43(2): 189 – 197.
LIU Rui, WU Kuihua, FENG Liang, et al. Voltage partition coordinated optimization control of active distribution network of high penetration distributed PVs[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2022, 43(2): 189 – 197.
- [12] 谢宇翔, 张雪敏, 罗金山, 等. 新能源大规模接入下的未来电力系统演化模型[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 421 – 430, 673.
XIE Yuxiang, ZHANG Xuemin, LUO Jinshan, et al. Evolution model for future power system under massive penetration of renewable energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2): 421 – 430, 673.
- [13] 周扬, 王主丁, 张漫, 等. 适应分布式资源渗透率提高的配电网网元规划方法[J]. 电网技术, 2025, 49(1): 306 – 315.
ZHOU Yang, WANG Zhuding, ZHANG Man, et al. A grid cell based distribution network planning method adapting to the increasing permeability of distributed resources [J]. Power System Technology, 2025, 49(1): 306 – 315.
- [14] RAMÍREZ-ROSADO I J, DOMÍNGUEZ-NAVARRO J A. New multiobjective tabu search algorithm for fuzzy optimal planning of power distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(1): 224 – 233.
- [15] 张铁峰, 高智慧, 左丽莉, 等. 分布式光伏接入配电网的选址定容优化研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2019, 46(1): 60 – 66.
ZHANG Tiefeng, GAO Zhihui, ZUO Lili, et al. Research on location and capacity optimization of distributed photovoltaic generation network connected to distribution network [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2019, 46(1): 60 – 66.
- [16] 陈德炜, 施永明, 徐威, 等. 基于改进 FPA 算法的含分布式光伏配电网选址定容多目标优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 120 – 125.
CHEN Dewei, SHI Yongming, XU Wei, et al. Multi-objective optimization method for location and capacity of a distribution network with distributed photovoltaic energy based on an improved FPA algorithm [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 120 – 125.
- [17] 杨博, 俞磊, 王俊婷, 等. 基于自适应蝠鲼觅食优化算法的分布式电源选址定容[J]. 上海交通大学学报, 2021, 55(12): 1673 – 1688.
YANG Bo, YU Lei, WANG Junting, et al. Optimal sizing and placement of distributed generation based on adaptive manta ray foraging optimization [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2021, 55(12): 1673 – 1688.
- [18] 方嘉伟, 谢玲玲. 基于 SVM-MODE 算法的分布式电源选址定容研究[J]. 电气技术与经济, 2021(3): 1 – 7.
FANG Jiawei, XIE Lingling. Research on site selection and capacity determination of distributed generation based on SVM-MODE algorithm [J]. Electrical Equipment and Economy, 2021(3): 1 – 7.
- [19] 刘柳, 赵俊勇, 马亮. 基于改进蝴蝶算法的分布式光伏选址定容[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(8): 152 – 158.
LIU Liu, ZHAO Junyong, MA Liang. Locating and sizing of distributed photovoltaic generation based on improved butterfly optimization algorithm [J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2023, 35(8): 152 – 158.
- [20] WATTS D J, STROGATZ S H. Collective dynamics of ‘small-world’ networks[J]. Nature, 1998(393): 440 – 442.
- [21] 孟仲伟, 鲁宗相, 宋靖雁. 中美电网的小世界拓扑模型比较分析[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(15): 21 – 24, 29.
MENG Zhongwei, LU Zongxiang, SONG Jingyan. Comparison analysis of the small-world topological model of chinese and american power grids [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(15): 21 – 24, 29.
- [22] XUE J, SHEN B. Dung beetle optimizer: a new meta-heuristic algorithm for global optimization [J]. The Journal of Supercomputing, 2023, 79(7): 7305 – 7336.
- [23] MOHAMMED H M, ABDUL Z K, RASHID T A, et al. A new K-means grey wolf algorithm for engineering problems [J]. World Journal of Engineering, 2021, 18(4): 630 – 638.
- [24] 文尚胜, 许函铭, 陈贤东, 等. 基于混合多策略优化的粒子滤波算法[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2022, 50(6): 49 – 59.
WEN Shangsheng, XU Hanming, CHEN Xiangdong, et al. Particle filter algorithm based on hybrid multi-strategy optimization[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2022, 50(6): 49 – 59.
- [25] 阎馨, 全洪燕, 屠乃威. 基于改进 FWA 的配电网优化重构方法研究[J]. 控制工程, 2024, 31(5): 833 – 841.
YAN Xin, QUAN Hongyan, TU Naiwei. Research on optimal reconfiguration method of distribution network based on improved FWA [J]. Control Engineering of China, 2024, 31(5): 833 – 841.

收稿日期: 2024-09-13; 网络首发日期: 2025-01-27

作者简介:

张雨(1983), 女, 高级工程师, 硕士, 研究方向为电力系统分析运行和电力系统数字化技术, 237398@qq.com;

王德辉(1986), 男, 高级工程师, 学士, 研究方向为电力信息与计算科学, 251763803@qq.com;

谭海东(2000), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为配电网运行规划, haidongtan@126.com。