

基于 GIS 与两阶段启发式算法的农村配变选址定容模型

乔辉¹, 韩胜峰¹, 韩天华¹, 徐华博¹, 张子引²

(1. 国网河北省电力有限公司邢台供电分公司, 河北 邢台 054001; 2. 北京恒华伟业科技股份有限公司, 北京 100011)

摘要: 为了进一步推进农村配电网系统的正常运行, 实现配电网管理的现代化, 研究根据农村地区地理信息, 基于遗传算法和变邻域搜索算法设计了用于配变选址定容的两阶段启发式模型。实验结果表明, 研究设计的两阶段启发式算法超体积最大为 0.93, 反世代距离最小为 0.06。该算法在 3 种不同的测试函数求解过程中综合求解性能较优。优化选址定容后, IEEE33 节点配电系统的最低电压为 0.9519 pu, 较其他方法显著提升, 改善了输电线路运行状况。此次研究两阶段启发式配变选址定容模型有助于农村电网的规划决策, 提高电网运输效率和电力服务质量, 减少建设和运营成本。

关键词: 农村配变; 选址定容; 地理信息系统; 遗传算法; 变邻域搜索算法; 两阶段启发式算法

中图分类号: TP18; TN743

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2025)12-0066-05

Rural distribution transformer site selection and capacity determination model based on GIS and two stage heuristic algorithm

QIAO Hui¹, HAN Shengfeng¹, HAN Tianhua¹, XU Huabo¹, ZHANG Ziyin²

(1. Xingtai Power Supply Branch of State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Xingtai 054001, China;

2. Beijing Forever Technology Co., Ltd., Beijing 100011, China)

Abstract: In order to further promote the normal operation of rural distribution network systems and achieve modernization of distribution network management. A two-stage heuristic model for transformer location and capacity determination is designed based on genetic algorithm and variable neighborhood search algorithm based on geographic information in rural areas. The experimental results show that the maximum hyper volume of the two-stage heuristic algorithm designed in the study is 0.93, and the minimum anti generation distance is 0.06. This algorithm has better overall solving performance in three different test function solving processes. After optimizing the site selection and capacity setting, the minimum voltage of the IEEE33 node distribution system is 0.9519 pu, which is significantly improved compared to other methods and improves the operation of the transmission line. The two-stage heuristic transformer location and capacity model in this study is helpful for the planning and decision-making of rural power grids, improving transportation efficiency and power service quality, and reducing construction and operation costs.

Keywords: rural distribution transformation; site selection and capacity determination; geographic information system; genetic algorithm; variable neighborhood search algorithm; two-stage heuristic algorithm

0 引言

随着乡村振兴战略工程的实施与推进, 农村地区的科技发展与生活水平不断提升, 电力需求不断增加。良好稳定的电力供应依赖于系统的电网规划, 然而, 农村地区普遍存在负荷密度与配电变压器空间分布不合理、电网设备利用率低以及电力供需不匹配的问题^[1]。缓解电网运行压力、优化农村电网结构的任务迫在眉睫。配电变压器是电力系统的重要组成部分, 主要用于将输电网中的高压电能转变、分配为适用于农田灌溉、生产和生活用电等低压电能。配电变压器的容量和合理选址对电网的安全稳定运行与区域配电具有重要意义。配电变压器的位置控制着电能的传输距离与电网的覆盖范围, 合理的选址可减少线路损耗和电压降低, 提高电能传输效率。配电变压器的

容量决定了农村地区的供电能力, 容量与负荷匹配合理才能维持地区供电的稳定性和质量^[2]。李钧超等考虑影响智能变电站规划的多种因素, 设计了变电站选址定容模型, 并采用改进的萤火虫算法进行求解^[3]。为了尽量提高电网覆盖率和变压器利用率, Yao 等基于多源大数据、机器学习、区域增长算法和遗传算法设计了城市变电站选址优化框架, 该方法可、可实现变电站的动态调节^[4]。但面对农村地区规划、扩展的快速变化, 现有选址定容规划模型的仍存在不足, 采用的算法仍存在容易陷入局部最优的问题。为了适应农村发展新格局, 满足农村用电需求, 研究利用性能优异的启发式算法、遗传算法 (genetic algorithm, GA) 和变邻域搜索算法 (variable neighborhood search, VNS) 设计了面向农村配变选址定容的两阶段规划模型。研究的创新性主要体现在利用不同的启发式算法分阶段地解决选址定容问题, 并且对算法的不足进行了改进, 有望丰富启发式算法的理论研究。同时, 该研究有望实现农村

* 基金项目: 国网河北省电力科技项目 (kjcb2023-003)

收稿日期: 2024-04-19

地区智能电网的发展,对于电力供给改善具有重要的现实意义。

1 基于地理信息与两阶段启发式算法的选址定容模型设计

1.1 农村配变选址定容模型第一阶段算法设计

农村地区的配变选址与定容设计要求选址定点需在用电负荷中心,电压稳定;考虑高压或低压线路的架空通道,巡视、检修、操作的空间;同时考虑农村经济长期发展状况。研究在地理信息系统(geographic information system, GIS)的支持下,收集农村地区电力负荷、电源分布、线路

走向以及设备运维条件等地理信息,基于GIS提供的空间定位框架确定选址候选区域。然后采用智能启发式算法设计配变选址、定容规划模型,根据候选地区容量需求,结合现有电力设备的容量和未来发展预测,确定合适的配变选址与容量^[5-6]。

两阶段启发式模型首先基于配变约束条件产生配变位置、容量的初始种群,计算选址规划的目标函数;然后应用两阶段启发式算法规划配变的位置和容量;最后判断是否满足设计条件^[7]。研究采用的第一阶段算法为GA,GA是一种受生物进化理论启发设计的优化算法,模拟自然选择机制实现种群的更迭与优化,传统GA工作流程如图1所示。

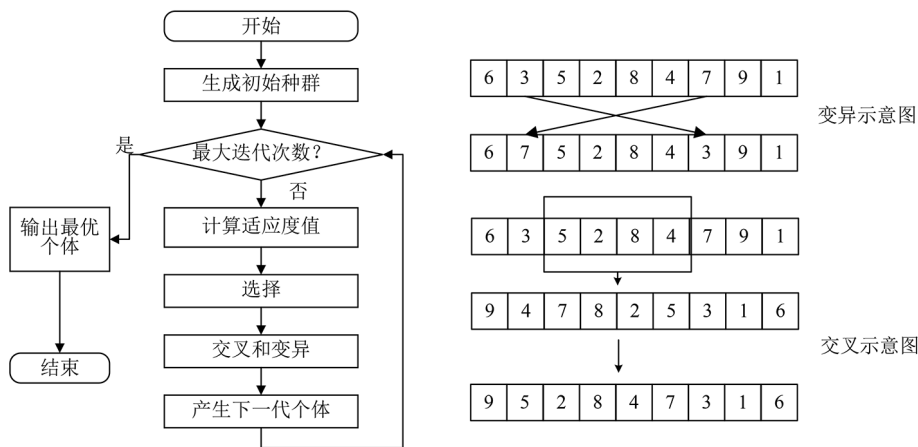


图1 传统遗传算法的工作流程图

GA将不同的配变地址、容量二进制编码为不同的染色体,将候选选址与容量视为初始化种群,根据约束条件设计适应度函数评估种群个体的优劣程度。GA的选择算子源于自然界的优胜劣汰机制,将适应度较高的个体选择出来进行遗传操作。个体的适应度值越高,代表优化问题的解越优秀。研究选用轮盘赌选择法进行个体选择,被选中的概率 p_i 的计算过程为

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^n f_i} \quad (1)$$

式中, f_i 表示种群个体的适应度值。被选中的个体进行交叉操作,随机选择基因交叉位置,产生新的个体;随后发生变异操作,基因突变生成新的个体。尽管交叉、变异操作增加了传统的GA算法的种群多样性,但面对复杂问题的优化,GA仍存在过度依赖初始化种群、收敛性不足以及易陷入局部最优的缺陷。为了提升GA在配电变压器选址、定容优化过程中规划性能,研究针对初始种群和遗传操作进行了优化改进。初始种群的多样性影响着算法的解空间搜索能力,种群多样性较差时容易导致算法陷入局部最优解,并影响算法的收敛速度^[8]。研究引入海明距离限制种群个体间距,尽量保证种群个体的多样性。

交叉与变异操作决定着个体的多样性和进化方向,合

理的交叉、变异操作有利于保持种群的多样性,提高算法的解空间探索能力和收敛速度。研究引入自适应概念,提升交叉操作的灵活性,自适应交叉概率 p_c 的计算过程为

$$\begin{cases} p_c = p_{cl} - k_1 \frac{f^i - f_{avg}}{f_{max} - f_{min}}, & f^i \geq f_{avg} \\ p_c = p_{cl}, & f^i < f_{avg} \end{cases} \quad (2)$$

式中, f^i 表示个体适应度值; f_{max} 、 f_{min} 、 f_{avg} 分别表示适应度最大值、最小值以及平均值; k_1 、 p_{cl} 为随机常数。GA常规算术交叉算子的计算过程为

$$\begin{cases} x'_A = \alpha x_A + (1 - \alpha) x_B \\ x'_B = \beta x_B + (1 - \beta) x_A \end{cases} \quad (3)$$

式中, x_A 、 x_B 表示父代; x'_A 、 x'_B 表示交叉后的子代; β 、 α 表示随机常数。由此可见,当 f_{avg} 的取值趋于稳定后,GA寻优进化过程会逐渐停止。因此,研究引入启发式交叉算子来产生子个体,启发式交叉算子的计算过程为

$$\begin{cases} x'_A = \gamma x_A + (1 - \gamma) x_B \\ x'_B = \gamma x_B + (1 - \gamma) x_A \end{cases} \quad (4)$$

式中, γ 表示启发式交叉系数,计算过程为

$$\gamma = \left[\frac{f(x_A)}{f(x_A) + f(x_B)} \right]^{\chi^{(n-1)}} \quad (5)$$

式中, χ 表示随机数, n 表示交叉过程中使用启发式交叉

算子的次数。最后,研究将算术交叉算子与启发式交叉算子混合,设计了混合交叉策略。最后,研究设计的自适应变异概率的计算过程为

$$\begin{cases} p_m = p_{m1} - k_2 \frac{f^i - f_{avg}}{f_{max} - f_{min}}, & f^i \geq f_{avg} \\ p_m = p_{m1}, & f^i < f_{avg} \end{cases} \quad (6)$$

式中, k_2, p_{m1} 为常数。

1.2 农村配变选址定容模型第二阶段算法设计

研究采用的第二阶段算法为 VNS, VNS 是一种基于局部搜索的启发式算法,可以克服传统算法容易陷入局部最优解的问题^[9-10]。通过使用不同的邻域结构扩大解空间的搜索范围,并在不同的邻域结构中交替应用基本的局部搜索过程进行搜索。VNS 算法主要由抖动和局部搜索两个部分组成,抖动是指在搜索过程中通过一系列随机或有规则的移动来跳出当前局部最优解。抖动可有效避免算法陷入局部最优解,扩大解空间搜索范围^[11-12]。将抖动的邻域结构集合定义为 $N_k (k = 1, 2, 3, \dots, k_{max})$, 设置 GA 计算得到的较优解为第二阶段的初始解;目标函数为 $f(x)$, 抖动过程随机选取全局最优解 x_m 的某一邻域结构,在该邻域内生成解 x' 。

VNS 工作流程如图 2 所示。由图 2 可见,局部搜索则是在当前解的邻域结构中进行搜索,通过一系列的改变和优化来寻求局部范围内相对最优解。定义邻域结构集合为 N_i , 局部搜索过程在解 x' 邻域结构 N_i 中搜索得到局部最优解 x'' , 对比 x'' 与 x' 对应的目标函数值,当 $f(x'') < f(x')$ 时,继续在邻域结构内进行局部搜索,直到找到最优解 x'' 。最后对比 x'' 与 x_m 对应的目标函数值,当 $f(x'') < f(x_m)$ 时,令全局最优解 $x_m = x''$, 并继续进行抖动操作直到达到最大迭代次数或最大求解时间,输出最优解。抖动

与局部搜索过程相互结合,通过交替执行,既可不断跳出局部最优解又可以在局部范围内寻找到更好的解^[13]。

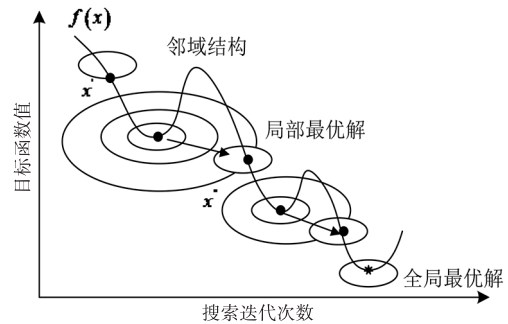


图 2 变邻域搜索算法工作流程

邻域结构 N_i 是 VNS 算法的关键模块,定义了问题解的变动方式,决定着 VNS 算法是否能跳出局部最优,合理的邻域结构更容易找到全局最优解。对此,研究采用 Exchange 算子邻域结构提高 VNS 算法求解质量。Exchange 算子通过随机地选择两个子路径,并交换子路径的交换点生成新的解。Exchange 算子可增加搜索空间的多样性,改善算法的收敛性和性能。

VNS 算法包括变邻域下降法 (variable neighborhood descent, VND) 和节约变邻域搜索算法 (reduced variable neighborhood search, RVNS) 两种变形形式。VND 是在不断在邻域结构内进行搜索,改善当前解,直到完成所有邻域结构的搜索。RVNS 更关注搜索效率的提升,通常情况下局部最优问题中不同邻域结构获得的局部最优解取值接近,因此 RVNS 仅在特定条件下才切换到更深或更广的邻域搜索,避免不必要的计算^[14-15]。研究联合使用了两种 VNS 变形形式,首先利用 RVNS 对初始解进行优化,然后在局部搜索过程中使用 VND。整个两阶段启发式算法的工作流程如图 3 所示。

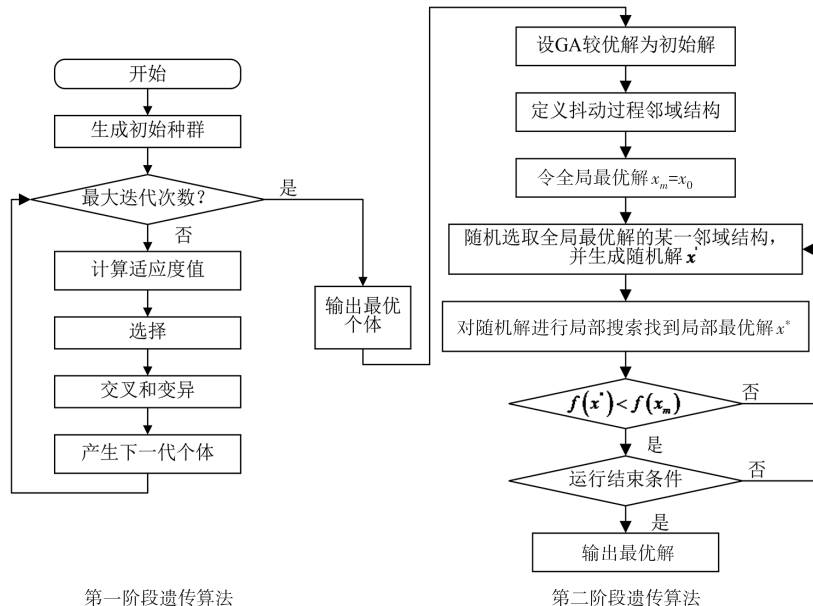


图 3 两阶段启发式算法工作流程

2 两阶段启发式农村配变选址定容模型性能测试与效果分析

为了验证研究设计模型的性能,研究进行了算法测试与应用分析实验。实验环境中操作系统为 Ubuntu 18.04,开发语言为 Python 3,编程语言为 Python 3.8,图形处理器为 GTX1080,中央处理器为 I5-10400f。基准测试函数包括单峰测试函数 Rosenbrock、多峰测试函数 Shaffer 和 Rastrigin。Rosenbrock 为非凸函数,局部最优点较多,最优值处于狭窄的碗状区域内;Shaffer 函数存在较多极小值点;Rastrigin 函数有较多局部最小值和一个全局最小值。

首先对比分析两阶段启发式算法的解空间搜索能力,选择超体积 (hypervolume indicator, HV) 与反世代距离 (inverted generational distance, IGD) 作为评价指标,平均统计结果如图 4 所示。

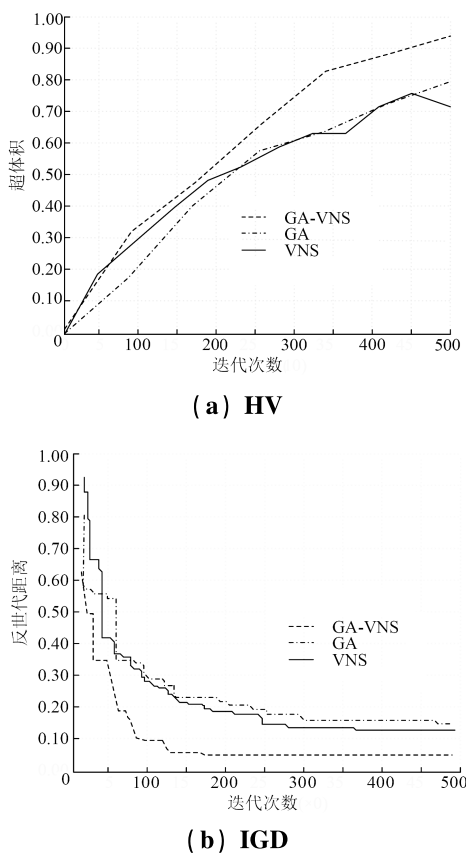


图 4 不同算法求解性能对比

由图 4(a)可见,研究改进的 GA-VNS 两阶段启发式算法相比传统的 GA、VNS 算法在 HV 取值上优势明显。GA-VNS 的 HV 值随迭代次数增加而增加的速率最快,且达到最高值 0.93;传统的 GA、VNS 算法则分别达到 0.79、0.71。HV 是衡量启发式算法 Pareto 前沿和参考点之间的体积大小的指标, HV 取值越大,算法性能越好。由图 4(b)可见,改进的 GA-VNS 两阶段启发式算法的 IGD 值在同等实验环境中取值最小,迭代早期便可收敛于最小值 0.06;对比之下,GA 与 VNS 算法的 IGD 值均大于 0.10,且收敛速率较慢。IGD 可衡量算法生成的近似 Pareto 前沿

与真实 Pareto 前沿之间的距离。IGD 取值越小,算法生成解与真实 Pareto 前沿越接近,算法性能越好。综合 HV 值与 IGD 值评价结果,研究改进的 GA-VNS 两阶段启发式算法具有较优的解空间搜索能力,能够搜寻生成较高质量的解。不同算法在 3 种不同测试函数上的计算结果对比情况如图 5 所示。

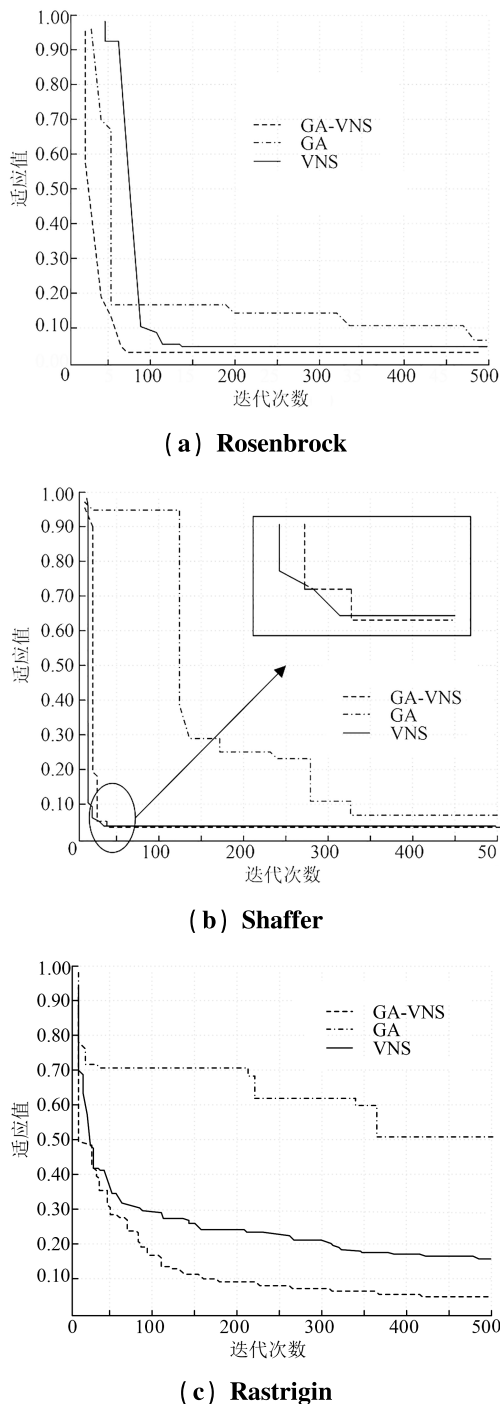


图 5 不同算法的测试函数计算结果对比

由图 5(a)可见,GA-VNS 两阶段启发式算法与 VNS 算法均取得较好的收敛结果,传统的 GA 算法在计算迭代过程陷入了局部最优解,收敛终止时的迭代次数接近最大迭代次数。可见在计算简单单峰测试函数时,VNS 算法、

GA-VNS 两阶段启发式算法均可计算得到较优值,但两阶段 GA-VNS 算法的迭代次数较少。由图 5(b)可见,GA-VNS 两阶段启发式算法计算结果与最优值最为接近,传统的 GA 算法仍存在陷入局部最优的情况。由图 5(c)可见,对于复杂多峰值分布函数,两阶段 GA-VNS 算法的计算值最接近全局最优,且迭代次数最少,150 次左右算法便逐渐收敛。综合可见,两阶段 GA-VNS 算法融合了 GA 与 VNS 算法的优势,GA 改进策略增加了种群多样性,联合 VNS 算法可帮助算法跳出局部最优实现快速寻优。

以 IEEE33 标准节点配电系统为例,进行配变选址与定容的规划研究。IEEE33 节点配电系统包含 33 个节点,32 条支路,5 条联络开关支路,1 个电源网络首端基准电压为 12.66 kV,三相功率标准值为 10 MVA。配变可安装在除平衡节点以外的任意负荷节点位置。4 种不同选址定容工况如图 6 所示。

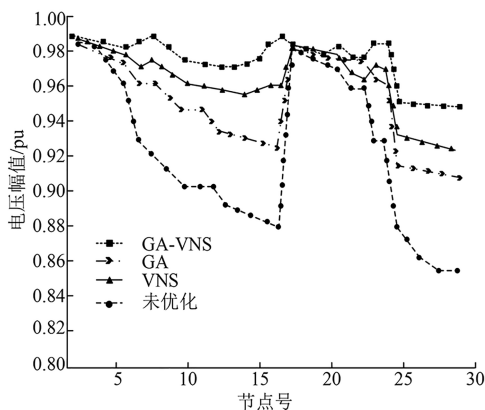


图 6 IEEE33 系统不同规划方案电压对比

由图 6 可见,相较于未使用算法的配变选址定容方案,其他三种算法规划结果均不同程度改善了电压幅值。未优化选址与定容的状态下,电压幅值最低值仅 0.857 9 pu。使用传统 GA 算法规划选址与定容时,最低电压为 0.912 5 pu;使用传统 VNS 算法规划选址与定容时,最低电压为 0.927 6 pu;使用两阶段 GA-VNS 算法规划选址与定容时,最低电压为 0.951 9 pu,最低电压提升明显。可见,使用研究设计的 GA-VNS 算法对配变选址与定容后,能够显著提升电网系统的电压。这表明输电线路的容量得到改善,相同设备情况下,选址定容优化后的线路可传输更多电力,并一定程度降低了输电线路上的电阻损耗。

3 结束语

随着经济社会发展水平的提升,农村地区的电网结构、装备水平不断提升。为了进一步提高农村地区的供电能力与质量,持续响应乡村振兴发展战略,研究基于 GA 与 VNS 算法设计了用于农村配变选址定容的两阶段启发式模型。实验结果表明,两阶段 GA-VNS 启发式算法在 HV 与 IGD 指标上取值较优,HV 最大为 0.93,传统的 GA、

VNS 算法仅 0.79、0.71;IGD 最小为 0.06,其他两种算法均高于 0.10。该方法在测试函数求解过程中计算取值最小,迭代次数最小。GA 改进策略与 VNS 算法协同改善了算法容易陷入局部最优的不足。IEEE33 标准节点配电系统经选址定容优化后,电压幅值显著提升,最低电压为 0.951 9 pu,输电质量改善。综上所述,此次研究设计的两阶段启发式模型对农村地区供电服务具有持续优化作用,有利于农村电网改造工程的推进。但今后的研究工作中还需针对实际应用场景中的配电选址定容问题进行多目标优化研究。

参考文献

- [1] 李金雨,宋福龙,马俊杰,等.基于 5G 基站可调度潜力与配电网集群划分的储能选址定容方法[J].电力系统自动化,2023,47(18):151-160.
- [2] 赵宇,李文博,郝俊.含电动汽车充电及可再生能源发电的配电网协同运行优化模型[J].自动化技术与应用,2025,44(8):62-66,125.
- [3] 李钧超,张辰,陈丹,等.考虑多站融合的智能变电站选址定容优化方法研究[J].电网与清洁能源,2022,38(3):61-67.
- [4] YAO Y, FENG C, XIE J, et al. A site selection framework for urban power substation at micro-scale using spatial optimization strategy and geospatial big data[J]. Transactions in GIS, 2023, 27(6):1662-1679.
- [5] 张振海.基于城市地理信息系统的土壤污染不确定性分析及地质修复[J].能源与环境,2022,44(12):92-95.
- [6] 张逸,张妍,张嫣,等.减缓电压暂降影响的电-气综合能源系统储气装置选址定容方法[J].电力自动化设备,2022,42(6):37-44.
- [7] 曾宇容,王林,王思睿.基于混合果蝇优化算法的选址-库存-配送集成优化研究[J].运筹与管理,2022,31(3):24-30.
- [8] 徐吉智,张新燕,常喜强,等.基于 PV 曲线和改进遗传算法储能选址定容研究[J].太阳能学报,2022,43(1):263-268.
- [9] 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.
- [10] 汤希峰,何杰,张浩.考虑碳排放的两阶段选址-路径问题及其算法[J].西南交通大学学报,2023,58(5):1110-1116.
- [11] 吴琛,刘晨曦,黄伟,等.提升新能源电力系统稳定性的构网型变压器选址定容方法[J].电力系统自动化,2023,47(12):130-136.
- [12] 陈希琼,胡大伟,王宁.多目标同时取送货选址-路径问题的多起点变邻域搜索算法[J].控制理论与应用,2022,39(7):1229-1241.
- [13] 李家桥,王国帮,张明乐,等.面向台区三相不平衡治理的自动换相装置选址定容规划[J].电力系统自动化,2022,46(19):62-69.
- [14] 廖勇,陈庆新,毛宁,等.基于有向图强连通改进变邻域搜索算法的 AGV 单向导向路径网络设计[J].工业工程,2022,25(4):80-90.
- [15] 景晓冬,郭景昌,严家福.数字孪生在核电设备领域中的关键技术应用研究综述[J].自动化技术与应用,2025,44(3):1-6.

作者简介:乔辉(1984—),男,硕士,高级工程师,研究方向:电气自动化。

通信作者:韩胜峰(1977—),男,本科,高级工程师,研究方向:电气自动化。