

# 计及失负荷等级和抢修效率的全能型 供电所多目标选址

朱文广<sup>1</sup>, 肖园<sup>1</sup>, 郑春<sup>1</sup>, 高骞<sup>2</sup>, 樊丽君<sup>3</sup>, 胡彩虹<sup>3</sup>

(1. 国网江西省电力有限公司经济技术研究院, 江西 南昌 330043; 2. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210024;  
3. 北京成和能源咨询有限公司, 北京 100053)

**摘要:**全能型供电所的科学选址,对于提升抢修效率,减少用户损失具有重要意义。为体现失负荷等级对供电所选址的影响,在分析全能型供电所业务特性的基础上,比较考虑失负荷等级 2 种情况下对应的抢修距离与成本的变化,建立供电所应急抢修多目标模型。采用 Pareto 支配的多目标粒子群算法进行模型求解,利用拥挤距离排序以更新非劣解集,并确定最终优化方案。最后,通过算例得出计及失负荷等级情况下加权距离与综合成本均优于未考虑负荷等级情况。仿真结果显示,该文构建的应急抢修多目标选址模型和提出的求解方法对全能型供电所抢修策略具有一定的指导意义。

**关键词:**全能型供电所;多目标选址;失负荷等级;Pareto 支配

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.02.018 中图分类号:TM72 文章编号:1673-9140(2021)02-0148-07

## The multi-target location of the versatile power supply station (VPSS) considering the loss of load level and the efficiency of emergency repair

ZHU Wenguang<sup>1</sup>, XIAO Yuan<sup>1</sup>, ZHENG Chun<sup>1</sup>, GAO Qian<sup>2</sup>, FAN Lijun<sup>3</sup>, HU Caihong<sup>3</sup>

(1. Economic and Technological Research Institute, State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd., Nanchang 330043, China; 2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China; 3. Beijing Chenghe Energy Consulting Co., Ltd., Beijing 100053, China)

**Abstract:** The scientific location of the VPSS is of great significance to improve the efficiency of emergency repair and reduce the loss of users. To reflect the impact of the load-loss level on the selected location of the power supply, this paper analyzes the service characteristics of the VPSS and compares whether the corresponding repair distance and cost change when the two conditions of the load-loss level are considered to establish the power substation emergency repair multi-objective model. After that, the pareto-dominated multi-objective particle swarm optimization algorithm is adopted to solve the model and the crowd distance sorting is utilized to update the non-inferior solution set and determine the final optimization scheme. Finally, the calculation example shows that the weighted distance and the comprehensive cost are better than the case of not considering the load level when the load level is taken into account. The results show that the multi-objective site selection model for emergency repairs constructed and the proposed solution method have certain guiding significance for the emergency repair strategies of the VPSS.

**Key words:** versatile power supply station; multi-target location; loss of load level; Pareto dominance

收稿日期:2019-07-10;修回日期:2019-11-22

基金项目:国家电网有限公司科技项目(52110118001s)

通信作者:朱文广(1972-),男,高级工程师,主要从事电力规划及管理研究;E-mail:jxzhuwenguang@126.com

配电网是保证用户服务以及民生的重要环节,配电网的运行效率会对用户供电的可靠性以及电能质量产生一定的影响,其稳定运行直接关系到人民的生活问题<sup>[1]</sup>。在建设智能配电网以及大量分布式电源接入配电网的大背景下,对配电网的供电可靠性、抵御自然风险的能力以及发生故障后的抢修恢复速度要求越来越高。电网公司采取了多种措施来保障配电网在发生故障后能够迅速恢复电力供应,采用大数据技术对配电网故障构建可视化模型<sup>[2]</sup>,可以有效地协助配电网灾后指挥及修复工作;建设“全能型”乡镇供电所,提出了“三型一化”营业厅的试点建设<sup>[3]</sup>;建设“泛在电力物联网”,提高电网设备的状态感知能力<sup>[4]</sup>。

然而在中国村镇地区,由于配变台区分布密集、容量小而使抢修工作难度增加,且随着配电网末端的电力设备逐年增多,网架结构更加复杂多样,供电所的抢修业务及抢修难度也随之增加,因此,对供电所进行科学选址能有效提升抢修效率、减少停电损失,并且对促进配电网的安全稳定运行具有一定的现实意义。

目前,针对配电网应急抢修选址的研究主要集中在模型构建和算法优化方面。文献[5]引入拉格朗日乘法简化所建立的二维空间非线性规划模型,运用免疫算法确定驻点最优位置;文献[6]提出了考虑负荷时变性的配电网多故障抢修恢复模型,采用粒子群算法对配电网多故障抢修顺序和故障恢复后网架重构优化问题进行研究;文献[7]考虑用户停电损失、停电时限约束以及电力应急服务成本以电力应急总成本最小为优化目标,采用 Floyd 算法进行求解应急服务多点选址优化模型;文献[8]在变电站确定的前提下,采用高斯混合模型对故障点位置进行统计聚类模拟,缩短抢修时间;文献[9]针对综合能源配电网灾后故障恢复,提出一种以停电损失最小为目标的考虑动态交通网络的两阶段应急恢复策略,在充分利用电网自我调控能力基础上采用应急电源进行抢修;文献[10]建立了综合考虑抢修资源分配、多小组协作、抢修顺序的配电网多点故障应急抢修优化模型,采用改进人工蜂群算法快速给出配电网发生多处故障后的应急抢修预案,减少了停电经济损失;文献[11]通过对步长及发现概率的改进,提出了基于改进布谷鸟(HICS)算法的电力

物资配送中心选址研究,改善了传统布谷鸟算法易于陷入局部最优和收敛性差的缺陷。以上文献均采用单目标模型或将多目标加权转化成单目标来求解,不能很好地体现各因素对选址的影响程度。

参考配电网抢修模型、建立供电所应急抢修多目标选址模型、以抢修的加权距离和供电所的年服务成本为目标,考虑配电网供电半径、到达距离等约束,利用 Pareto 支配的多目标粒子群算法(multi-objective particle swarm optimization, MOPSO)对所建模型进行求解,通过对比是否考虑失负荷等级的 2 种情况,得出最优方案。

## 1 配网用户侧供电所选址模型

### 1.1 供电所与故障点间的加权距离

该文以供电所到故障点的加权距离最短为目标,能够很好地体现抢修过程中的各个不确定性因素的影响。供电所到故障点的欧氏距离<sup>[12]</sup>为

$$D_{ij} = |X_i - U_j| \quad (1)$$

式中  $X_i = (x_i, y_i)$  为供电所  $i (i=1, 2, \dots, m)$  坐标;  $U_j = (u_j, v_j)$  为故障点  $j (j=1, 2, \dots, n)$  坐标。

由于该文考虑了天气、道路拥堵与道路偏移这 3 种因素,因此,供电所抢修的加权距离为

$$\min f_1 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left\{ \sum_{jj=00 \sim 11} \omega_{jj} \left( \sum_{T_{00} \sim T_{11}} \frac{\omega_K D_{ij}}{\lambda_e} \right) \right\} \quad (2)$$

式中  $\omega_K$  为故障点的道路偏移系数,可以减少采用理想直线路径计算给结果带来的误差;  $\lambda_e (e=1, 2, 3)$  为负荷等级权重系数;  $\omega_{jj} (jj=00 \sim 11)$  为天气与时段耦合权重,该文分为 4 种场景:好天气不拥堵时段  $T_{00}$ 、坏天气不拥堵时段  $T_{01}$ 、好天气拥堵时段  $T_{10}$  以及坏天气拥堵时段  $T_{11}$ ,这 4 种场景概率之和为 1。通过统计每个场景出现频次得到响应权重。

### 1.2 综合成本

在配网用户侧供电所选址优化理论中,经济性是必不可少的因素之一,该文将供电所的建设费用按使用年限折算到每一年,并与当年的运行维护费用叠加作为该年年服务成本。综合成本的计算为

$$\min f_2 = C_1 + C_2 \quad (3)$$

式中  $C_1$ 、 $C_2$  分别为供电所到故障点的运输成本

与供电所建设的年服务成本。

$$C_1 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\delta_{ij} k_{ij} D_{ij} + \alpha (D_{ij} - R_i) p_{ij}) \quad (4)$$

$$C_2 = \sum_{i=1}^m \delta_{ij} S_i \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^m \delta_{ij} = 1, \forall j \quad (6)$$

$$\delta_{ij} \in \{0, 1\} \quad (7)$$

$$p_{ij} = \begin{cases} 1, & D_{ij} > R_i \\ 0, & D_{ij} \leq R_i \end{cases} \quad (8)$$

式(4)~(8)中  $\delta_{ij}$  为故障点  $j$  物资仅由供电所  $i$  抢修;  $k_{ij}$  为供电所  $i$  到故障点  $j$  单位运输费用;  $\alpha$  为惩罚系数;  $R_i$  为供电所  $i$  的抢修半径;  $p_{ij}$  表示故障点  $j$  是否在供电所  $i$  的抢修范围内;  $S_i$  为供电所  $i$  的年服务成本。式(6)表示每个故障点仅由一个供电所抢修;式(7)、(8)为参数取值。

### 1.3 约束条件

根据配电网抢修的业务情况,可以得到供电半径约束和距离约束,供电所的供电半径的计算为

$$\min X_{ij} \leq R_i \leq R_{\max} \quad (9)$$

式中  $R_i$  为供电所  $i$  的供电半径;  $\min X_{ij}$  为供电区域内供电所到故障点的最短距离;  $R_{\max}$  为该供电所所允许的最大供电半径,与当地经济发展水平、负荷重要程度及密集程度还有电压等级有关。

根据 95598 热线对各地区抢修到达时间约束的规定,得到抢修小队到达的时间约束:

$$D_{ij} \leq \bar{v}_{ij} \omega_K T \quad (10)$$

式中  $\bar{v}_{ij}$  为抢修小队从供电所  $i$  出发到故障点  $j$  的平均行驶速度,该数值可参照故障点的历史信息获得;  $T$  为 95598 规定的到达时间,不同地区有所差异。

供电所的位置坐标约束:

$$x_{\min} < x_i < x_{\max} \quad (11)$$

$$y_{\min} < y_i < y_{\max} \quad (12)$$

式(11)、(12)中  $x_{\max}$ 、 $x_{\min}$  和  $y_{\max}$ 、 $y_{\min}$  分别为供电所的横、纵坐标的上、下限约束。

## 2 Pareto 支配的 MOPSO 算法求解

### 2.1 MOPSO 算法

传统粒子群算法为单目标模型,由于其惯性权重缺乏指导,种群多样性不能得到保证,易于陷入局

部最优,因此,该文采用 Pareto 支配的多目标粒子群算法求解,引入 NSGA-II 算法的快速非支配排序和拥挤距离,判断各粒子对应优化方案的支配关系,生成非劣解并存入外部存储库,通过拥挤距离排序,剔除超出种群规模的解集,实现非劣解集更新并确定优化方案的选取。大幅提高了算法的全局搜索寻优能力,从而使得 Pareto 最优解能够分布更加均匀,保证了种群的多样性,即保证了供电所坐标的多样性。

#### 1) 变权重粒子群算法。

变权重粒子群算法中粒子的位置与速度计算公式为

$$v^{t+1} =$$

$$\omega v^t + c_1 r_1 (p^t - x^t) + c_2 r_2 (g^t - x^t) \quad (13)$$

$$x^{t+1} = x^t + v^{t+1} \quad (14)$$

式(13)、(14)中  $\omega$  为自适应权重;  $c_1$ 、 $c_2$  为动态学习因子;  $r_1$ 、 $r_2$  为  $[0, 1]$  间的随机数;  $p^t$ 、 $g^t$  为  $t$  次迭代个体最优与全局最优;  $x$ 、 $v$  为粒子位置与速度。

$$\omega = \omega_{\max} - (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \frac{r_{\max} - r}{r_{\max}} \quad (15)$$

式中  $\omega_{\max}$ 、 $\omega_{\min}$  为权重的最大、小值;  $r$  为当前迭代次数;  $r_{\max}$  为最大迭代次数。

#### 2) 选择、交叉与变异。

为保证粒子的多样性,引入自适应遗传算法的交叉、变异操作,交叉和变异概率分别为

$$P_c = \begin{cases} k_1 (f_{\max} - f) / (f_{\max} - f_{\text{avg}}), & f \geq f_{\text{avg}} \\ k_2, & f < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (16)$$

$$P_m = \begin{cases} k_3 (f_{\max} - f') / (f_{\max} - f_{\text{avg}}), & f' \geq f_{\text{avg}} \\ k_4, & f' < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (17)$$

式(16)、(17)中  $P_c$ 、 $P_m$  分别为交叉概率、变异概率;  $f_{\max}$ 、 $f_{\text{avg}}$  为群体最大适应度值与平均适应度值;  $f$  为要交叉的 2 个个体中较大的适应度值;  $f'$  为变异个体的适应度值;  $k_1 \sim k_4$  为常数,且  $k_1 < k_2$ ,  $k_3 < k_4$ 。

#### 3) Pareto 最优解。

多目标优化问题即在多个目标之间进行权衡,然后找到一组最优解,即 Pareto 最优解集,能最优

地权衡多目标问题中需要折衷的不同目标<sup>[11]</sup>。通过判断不同方案之间的支配关系来确定最优方案。

对于任意向量  $u, v \in \Lambda$ ,  $u = \{u_1, u_2, \dots, u_k\}$ ,  $v = \{v_1, v_2, \dots, v_k\}$ ,  $\forall i \in \{1, 2, \dots, k\}$  满足  $u_i \leq v_i$ , 且  $\exists j \in \{1, 2, \dots, k\}$ , 使得  $u_j < v_j$ , 则称  $u$  支配  $v$ , 记作  $u < v$ 。

4) 拥挤距离。

引入 NSGA-II 算法的快速非支配排序、外部存储库与拥挤距离, 通过拥挤距离排序构造 Pareto 最优集。拥挤距离<sup>[13]</sup>:

$$f_d(i) = f'_d(i) + \frac{f_n(i+1) - f_n(i-1)}{f_n^{\max} - f_n^{\min}} \quad (18)$$

式中  $f_d(i)$  为拥挤距离;  $f_n^{\max}$ 、 $f_n^{\min}$  为第  $n$  个目标函数的最大、小值;  $f_n(i)$  为第  $i$  个体的第  $n$  个目标函数值。

## 2.2 选址流程

该文通过配电网故障抢修系统(TCM)获取故障工单的信息, 共设置 4 个 sheet 表格, 每行代表一个参数, 每个表格分别包括供电所的年服务成本以及供电半径; 参数  $\omega_K$ 、 $T_{00} \sim T_{11}$ 、 $\omega_{00 \sim 11}$ 、 $k_{ij}$  以及  $\lambda_e$ ; 参数  $\bar{v}_{ij}$  与  $T$ ; 故障点横纵坐标、失负荷等级及其系数。

根据故障抢修模型以及 Pareto 支配的多目标粒子群算法, 供电所应急抢修多目标选址优化流程如图 1 所示。

1) 初始化种群。读取数据, 并对粒子群的初始参数赋值, 随机更新粒子速度与位置, 并设置粒子适应度函数。

2) 建立模型。采用  $K$ -means 聚类进行抢修区域划分, 根据式(1)~(8)计算目标函数, 根据式(9)~(12)对粒子设置约束条件。

3) 计算个体当前适应度函数, 并得到平均适应度函数。

4) 判断支配关系生成非支配排序, 根据式(18)计算拥挤距离, 剔除存档内部支配解, 并存入外部档案。

5) 更新个体最优与种群最优, 根据式(16)、(17)对粒子进行交叉、变异。

6) 更新迭代权重  $\omega$ 、粒子速度与位置, 并对粒子边界进行处理。

7) 再次判断支配关系, 保留非支配解。

8) 未达到最大迭代次数时重复步骤 2~7。

9) 输出 Pareto 前沿图, 根据非支配排序得到最优方案。

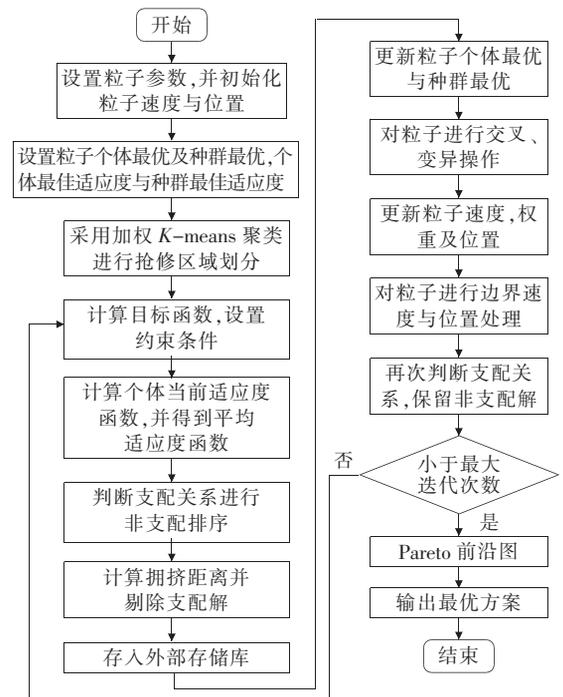


图 1 供电所应急抢修多目标选址优化流程

Figure 1 Flow chart of multi-objective site selection optimization in power supply station emergency repair

## 3 算例分析

采用华北地区某城市的部分故障负荷数据进行该区域的供电所的优化选址。该文选择 2018 年 7 月的历史数据进行算例分析, 其中, 故障点 39 个, 供电所 3 个, 失负荷等级与对应的权重系数<sup>[14-16]</sup>如表 1 所示, 多目标粒子群中粒子个数为 300, 离子维度为 6, 最大迭代次数 50, 最大权重 0.8, 最小权重 0.4, 随机初始化粒子位置与速度。

Pareto 支配的多目标粒子群算法进行供电所选

表 1 失负荷等级及权重系数

Table 1 Loss of load level and weight coefficients

负荷等级	负荷编号	权重系数
一级	7, 10, 22, 24, 29, 32, 36, 39	400
二级	1, 3, 5, 8, 11, 13, 14, 16, 18, 21, 23, 26, 27, 31, 33, 35, 37	20
三级	2, 4, 6, 9, 12, 17, 19, 25, 28, 30, 34, 38	1

址的优化,通过非支配排序得到最优解,2种情况下的 Pareto 前沿分别如图 2、3 所示,是否考虑失负荷等级情况下的 3 种方案对应的距离、成本如表 2 所示。

根据图 2、3 可以看出,2 种情况下均能得到最优解,但由于 2 个目标函数取值不均匀而导致 Pareto 前沿不连续。根据 2 种情况下的 Pareto 前沿可以得到最优解以及单个目标函数取得最优值,其结果见表 2,可以看出:当  $f_1$  取得最小加权距离时,得到的综合成本较高,当  $f_2$  综合成本最低时,供电所到故障点的加权距离不能保证最短。因此,兼顾距离与成本这 2 个因素,选择拥挤距离最短得到最优方案。

根据表 2 中 2 种情况下的最优解绘制供电所抢

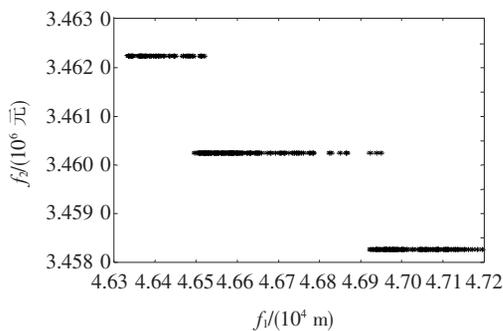


图 2 未考虑失负荷等级情况下的 Pareto 前沿

Figure 2 Pareto frontier map without considering load level

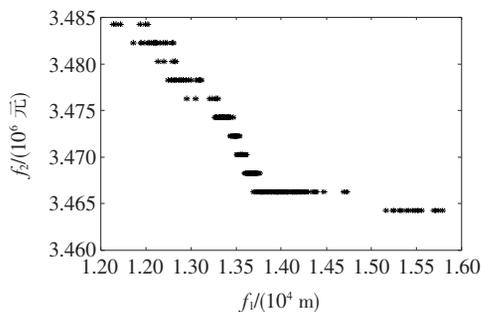


图 3 考虑失负荷等级情况下的 Pareto 前沿

Figure 3 Pareto frontier map considering loss of load level

修坐标,如图 4、5 所示。对比两图可以看出,图 5 中供电所的位置更加靠近一级负荷,且故障点由距离其最近的供电所负责抢修。根据图 4、5 中供电所的位置坐标以及所负责抢修的故障点序号可以得出选址结果,如表 3 所示。

表 2 不同方案对比

Table 2 Comparison of different schemes

优化方案	未考虑失负荷等级		考虑失负荷等级		说明
	距离/ km	成本/ 万元	距离/ km	成本/ 万元	
最优解	47.025	345.826	13.475	345.226	拥挤距离最短
$f_1$ 最小值	46.394	346.220	12.102	348.431	抢修距离最短
$f_2$ 最小值	47.150	345.020	15.721	344.430	成本最低

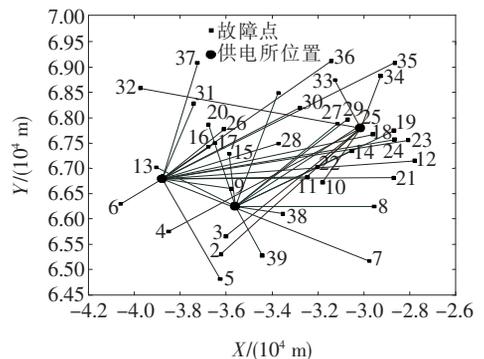


图 4 未考虑失负荷等级情况下的供电所抢修分布

Figure 4 Distribution map of power supply stations without considering the loss of load

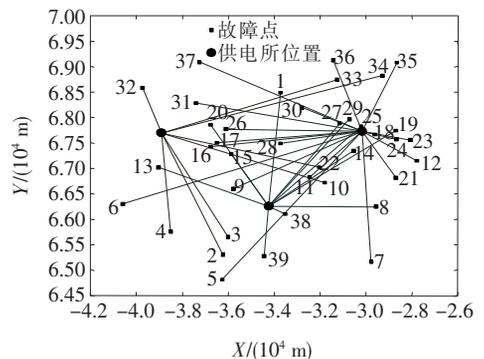


图 5 考虑失负荷等级情况下的供电所抢修分布

Figure 5 Distribution map of power supply stations considering loss of load

表 3 2 种情况下的供电所选址结果

Table 3 Power station location selection results under two conditions

名称(从右至左)	未考虑失负荷等级	考虑失负荷等级
各供电所负责抢修的故障点序号	5;7;9;11;12;16;18;21;23;24;26;28;30;31;35;37	5;7;9;11;12;16;18;21;24;26;28;30;31;35;37
	1;8;13;15;19;20;25;27;29;38;39	1;8;13;15;19;20;25;27;29;38;39
	2;4;10;22;32;34	2;4;10;22;32;34
	[−30 188.000,67 683.345]	[−30 446.702,67 659.093]
供电所的横、纵坐标	[−34 995.715,67 297.350]	[−34 169.000,66 250.689]
	[−39 631.740,67 709.519]	[−39 882.029,67 706.273]

综合表 2、3 可以得到,在考虑失负荷等级情况下,加权距离与综合成本均优于未考虑失负荷等级情况,其主要原因为考虑失负荷等级时,供电所更加靠近重要负荷,尤其是一级负荷,从而降低了一级负荷的抢修成本。观察 2 种情况下的供电所位置坐标,最左侧供电所位置变化较小,因此,决策者可根据实际情况做出相应的调整。

2 种情况下供电所的抢修范围分布情况分别如图 6、7 所示,可以看出,当考虑失负荷等级时,各个抢修区域内的故障点分布更加均匀,抢修半径之间的重叠面积变小,供电所的抢修压力得以降低,各个抢修区域内的负责抢修的故障点界限更加清晰,抢修任务分配更加明确,从而能够有效提升抢修效率。

是否考虑失负荷等级 2 种情况下目标函数  $f_2$  的收敛情况分别如图 8、9 所示,可以看出,迭代到第 17 次时两曲线能够收敛,且考虑失负荷等级时  $f_2$  的最优适应度曲线能够更加快速收敛。因此,使用多目标粒子群算法求解供电所选址问题时结果可以快速收敛,验证了所用算法的正确性。

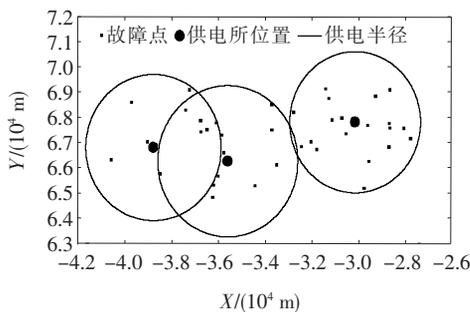


图 6 未考虑失负荷等级的供电所抢修范围分布情况

Figure 6 Distribution of rush repair range of power supply stations without considering the class of loss of load

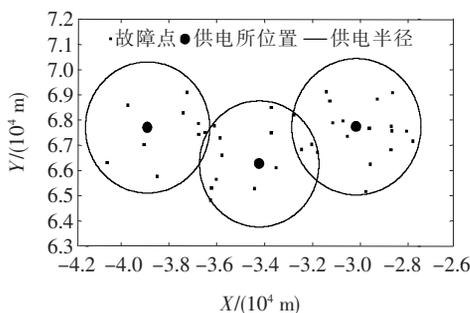


图 7 考虑失负荷等级的供电所抢修范围分布情况

Figure 7 Distribution of rush repair range of power supply station considering the loss of load class

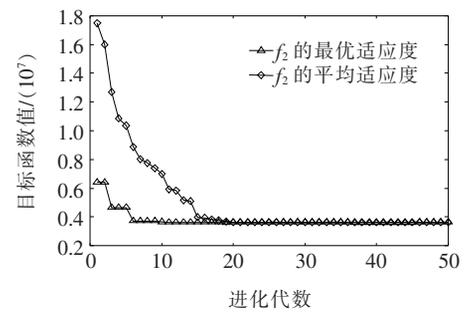


图 8 未考虑失负荷等级的适应度曲线

Figure 8 Fitness curve without considering the loss of load class

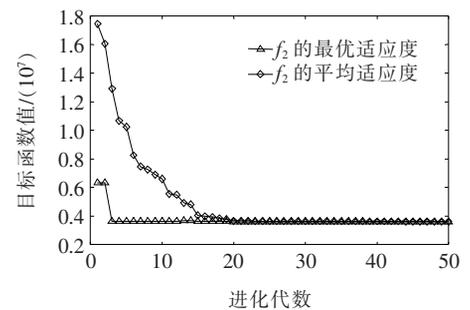


图 9 考虑失负荷等级的适应度曲线

Figure 9 Fitness curve considering loss of load class

## 4 结语

供电所的科学选址对配电网的安全稳定运行具有重要意义。该文为研究失负荷等级对供电所应急抢修选址的影响,分别从抢修的加权距离与综合成本两方面入手,对比是否考虑失负荷等级前后两者的变化,通过算例得出:在规划供电所选址时,计及失负荷等级能够缩短抢修距离和减少成本,同时降低抢修压力,该文所提出的选址模型与求解方法对供电所应急抢修的开展具有一定的指导意义。

## 参考文献:

- [1] 张谢,陈小龙,桂宁,等.基于多源信息感知的配电侧故障预判[J].电网与清洁能源,2019,35(12):25-30.  
ZHANG Xie, CHEN Xiaolong, GUI Ning, et al. Pre-judgment of distribution side fault based on multi-source information perception[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(12): 25-30.
- [2] 张国荣,罗柳,彭勃,等.基于柔性多状态开关的有源配电网双层优化方法[J].电测与仪表,2020,57(24):58-65.  
ZHANG Guorong, LUO Liu, PENG Bo, et al. Bi-level optimization method for active distribution network based on

- soft open point[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2020, 57(24): 58-65.
- [3] 张煜, 牟龙华, 王蕴敏, 等. 计及可控负荷动态调节的主动配电网优化调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(4): 104-110.  
ZHANG Yu, MU Longhua, WANG Yunmin, et al. Optimal dispatching of an active distribution network considering dynamic regulation of controllable load[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(4): 104-110.
- [4] 张立静, 盛戈皞, 江秀臣. 泛在电力物联网在变电站的应用分析与研究展望[J]. *高压电器*, 2020, 56(9): 1-10.  
ZHANG Lijing, SHENG Gehao, JIANG Xiuchen. Application analysis and research prospects of ubiquitous power internet of things in substation[J]. *High Voltage Apparatus*, 2020, 56(9): 1-10.
- [5] 孟军, 施萱轩, 陈中, 等. 配电网故障供电所选址与抢修任务分配优化策略[J]. *广东电力*, 2018, 31(3): 120-126.  
MENG Jun, SHI Xuanxuan, CHEN Zhong, et al. Optimization strategy for site selections for fault repair stagnation points of power distribution network and repair task allocations[J]. *Guangdong Electric Power*, 2018, 31(3): 120-126.
- [6] 马瑞, 张海波, 王建雄, 等. 考虑负荷时变性的配电网故障抢修恢复策略[J]. *电力科学与技术学报*, 2019, 34(2): 20-27.  
MA Rui, ZHANG Haibo, WANG Jianxiong, et al. Research on fault rush repair and recovery strategy of distribution network considering time variation of load[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2019, 34(2): 20-27.
- [7] 梁博森, 王宏, 林振智, 等. 电力系统应急服务多点最优选址规划[J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(18): 40-45.  
LIANG Bomiao, WANG Hong, LIN Zhenzhi, et al. Optimal siting of power emergency multi-point service provisions[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(18): 40-45.
- [8] 傅晓飞, 廖天明, 李肇卿, 等. 基于统计聚类法的城市配电网抢修驻点优化配置[J]. *供用电*, 2017, 34(2): 40-43.  
FU Xiaofei, LIAO Tianming, LI Yuqing, et al. Optimal allocation of repair stations in urban distribution network based on statistical clustering method[J]. *Distribution & Utilization*, 2017, 34(2): 40-43.
- [9] 姜心怡, 陈健, 司凯伦, 等. 考虑动态交通网络的综合能源配电网灾后紧急响应策略[J]. *智慧电力*, 2020, 48(8): 31-37+83.  
JIANG Xinyi, CHEN Jian, SI Kailun, et al. Emergency response strategy of integrated energy distribution network considering dynamic transportation network[J]. *Smart Power*, 2020, 48(8): 31-37+83.
- [10] 高兆丽, 胥明凯, 丁素英, 等. 基于改进人工蜂群算法的配电网多点故障应急抢修优化调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(13): 107-114.  
GAO Zhaoli, XU Mingkai, DING Suying, et al. Optimization scheduling of multi-fault rush repair for distribution networks based on modified artificial bee colony algorithm[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(13): 107-114.
- [11] 王喜平, 郗少媛, 赵齐. 基于HICS算法的电力物资配送中心选址研究[J]. *电力科学与工程*, 2018, 34(10): 1-7.  
WANG Xiping, QIE Shaoyuan, ZHAO Qi. Research on location of power supplier distribution center based on improved cuckoo algorithm[J]. *Electric Power Science and Engineering*, 2018, 34(10): 1-7.
- [12] Mohamed Sayed, Sawsan Morkos Gharghory, Hanan Ahmed Kamal. Euclidean distance-based multi-objective particle swarm optimization for optimal power plant set points[J]. *Energy Systems*, 2016, 7(4): 1-13.
- [13] 邓凯文, 韩肖清, 梁琛. 精英非支配排序算法与改进粒子群算法相结合的储能优化配置[J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(20): 171-177.  
DENG Kaiwen, HAN Xiaoqing, LIANG Chen. Optimal Configuration of energy storage based on elitist non-dominated sorting genetic algorithmic with improved multi-objective particle swarm optimization[J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(20): 171-177.
- [14] 左一多. 多目标优化问题的粒子群算法及其性能分析[D]. 北京: 中国地质大学, 2013.
- [15] 陈广宇, 柳慧琴, 邱文祥, 等. 基于适应度的配电网多故障抢修任务分配策略[J]. *电力自动化设备*, 2014, 34(11): 67-74.  
CHEN Guangyu, LIU Huiqin, QIU Wenxiang, et al. Fitness-based task allocation strategy for multi-fault repair of distribution system[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2014, 34(11): 67-74.
- [16] 卢志刚, 孙卜, 刘照拯, 等. 基于改进离散多目标BCC算法的配电网灾后抢修策略[J]. *电力系统自动化*, 2011, 35(11): 55-59.  
LU Zhigang, SUN Bo, LIU Zhaozheng, et al. A rush repair strategy for distribution networks based on improved discrete multi-objective BCC algorithm after discretization[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2011, 35(11): 55-59.