

# 考虑配电网负荷波动和电压偏移的 充电站优化规划

曹佳佳, 王 淳, 霍崇辉, 罗晨煜, 陶多才, 吴潇翔

(南昌大学能源与电气工程系, 江西 南昌 330031)

**摘要:**为了减少充电站选址定容对配电网产生的不利影响,提出考虑配电网负荷波动和电压偏移的电动汽车充电站优化规划模型。首先,综合考虑投资运营者成本和用户成本,构建充电站的投资建设成本、运营维护成本以及用户成本总和最小化的优化模型。其次,在配电网约束条件下,建立配电网的网损最小、负荷波动率最小以及电压偏移指标最小的评价模型。采用遗传算法与 Voronoi 图联合求解,得到充电站的站址和容量,并选择出对配电网影响最小、总成本较小等综合最优的方案。最后,将规划区域内交通网络和电网信息相结合进行仿真。仿真结果验证该模型的合理性和有效性。

**关键词:**电动汽车;充电站规划;负荷波动率;电压偏移指标;遗传算法;Voronoi 图

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.04.002 中图分类号:TM93 文章编号:1673-9140(2021)04-0012-08

## Optimal planning of electric vehicle charging stations considering the load fluctuation and voltage offset of distribution network

CAO Jiajia, WANG Chun, HUO Chonghui, LUO Chenyu, TAO Duocai, WU Xiaoxiang

(Department of Energy and Electrical Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

**Abstract:** In order to reduce the adverse impact of location and capacity of charging station in distribution network, this paper considers the load fluctuation and voltage offset of the distribution network to build a optimal planning model for the location and size of electric vehicle (EV) charging stations. First of all, the cost of investment operator and the cost of user are comprehensively considered to construct the optimization model that minimizes the sum of investment and construction costs, operation and maintenance costs, and user costs of charging stations. Then, under the distribution network constraints, the evaluation model is built for the distribution network with the smallest loss, the smallest load fluctuation rate, and the smallest voltage offset indicator. Genetic algorithm is combined with Voronoi diagram to obtain the site and capacity of the charging station and select the comprehensive optimal scheme with the least impact on the distribution network and the total cost. Finally, the transportation network and power grid information are combined in the planned area. The simulation results verify the rationality and effectiveness of the model.

**Key words:** EV; charging stations planning; load fluctuation rate; voltage offset indicator; genetic algorithm; Voronoi diagram

收稿日期:2020-06-24;修回日期:2020-10-21

基金项目:国家自然科学基金(51467012)

通信作者:王 淳(1963-),男,博士,教授,主要从事电力系统规划、优化理论在电力系统中的应用研究;E-mail:cu\_wang@162.com

电动汽车作为低污染、零排放的交通工具,能够有效地减少碳排放,缓解环境压力和能源危机<sup>[1]</sup>。近年来,电动汽车在全球范围内受到普遍的推崇,各国政府纷纷制定相关政策来保护和激励电动汽车的快速发展。然而,电动汽车的大规模使用需要充电设施作为支撑。电动汽车配套的充电基础设施规划建设是制约电动汽车发展的主要因素之一<sup>[2]</sup>。建设高效、完备的电动汽车充电站服务系统对电动汽车产业的发展尤为重要。

众多学者对电动汽车充电站规划问题进行了研究。文献[3]总结了充电设施规划研究中采用的充电需求分布预测方法,梳理了相应的规划目标及约束条件,并概述了现有的电动汽车充电设施的选址定容模型与方法;文献[4]建立了一个以总投资成本、运维成本、购电成本和充电站用户成本最小为目标的线性整数规划模型;文献[5]提出了基于用户利益的充电设施优化规划方案;文献[6]搭建了用户时间成本、电池更换成本、运行成本和运营商成本最小的目标函数;文献[7-9]构建了以运营者与用户的综合效益为目标的电动汽车充电站优化规划数学模型;文献[10]根据寒冷地区城市中建设充电站应考虑到的问题,提出了考虑环境因素的充电站规划方案;文献[11]按照北京市不同功能区的特征对其电动汽车充电站进行选址,构建了针对北京市不同功能区的电动汽车充电站的选址指标体系;文献[12-16]提出了分布式电源与电动汽车充电站联合规划模型。

现有的充电站规划方案主要考虑了充电站的交通地理位置、投资及运行成本以及用户成本和分布式电源等,考虑配电网影响的文献相对较少。文献[17-18]分别提出了分布式电源、充电站、配电网综合优化规划模型和考虑电动汽车充电负荷和分布式储能选址定容的多阶段联合规划模型,但均没有考虑配电网电压稳定性;文献[19-20]分别基于系统电压稳定性和节点电压偏移最小化,建立了充电站规划的多目标优化模型,但没有考虑充电负荷对电网负荷的影响;文献[21]将集中型充电站的规划与配电网调度相结合,建立了考虑削峰填谷作用的集中型充电站选址定容二层规划模型,但没有考虑充电站规划对系统电压的影响;文献[22]考虑了引导型

充电控制策略的充电设施与含有分布式光伏、储能的配电系统的协同规划问题,建立了双层优化模型。综上所述,现有考虑配电网影响进行充电站规划的文献几乎都是从电压稳定或负荷波动单一角度出发,同时考虑配电网负荷波动和电压偏移对充电站进行规划的文献几乎没有。

该文提出考虑配电网负荷波动和电压偏移的电动汽车充电站优化规划模型。首先,根据城市路网交通流量比重将充电需求分配至路网节点,然后,以充电站的投资建设成本、运营维护成本以及用户成本总和最小化为目标来进行优化规划,并在配电网约束条件下,以配电网的网损最小、负荷波动率最小以及电压偏移指标最小建立评价模型。采用遗传算法结合 Voronoi 图联合求解所建模型,确定充电站站址、服务范围和充电设施数量,选择出满足充电需求、对配电网影响最小且经济较优的方案。最后,算例中采用 IEEE 33 节点测试系统,将规划区域内交通网络和电网信息相结合进行仿真校验,验证该规划模型的合理性和有效性。

## 1 优化规划模型

### 1.1 充电需求分布

对于充电需求分布的处理,经典的方法是基于点需求,将充电需求看作是散落在区域内离散的、没有关系的一系列的需求点。该文根据道路网中车流量大小,将充电需求按车流量比重分配在各路网节点处,表达式<sup>[4]</sup>为

$$W_m = \frac{f_m}{\sum_{m \in N_r} f_m} W_c, \forall m \in N_r \quad (1)$$

式中  $W_m$  为路网节点  $m$  的充电需求大小; $m$  即充电需求点; $N_r$  为充电需求点总和; $W_c$  为总日充电需求; $f_m$  为路网节点  $m$  的车流量比重。

### 1.2 充电站座数预估

将充电站的数量控制在合理的区间内可减小染色体长度,增加运算速度。在已知规划区域内的总充电需求的前提下,根据充电站容量上、下限来确定规划区内所需的充电站座数范围:

$$\begin{cases} D_{\min} = \text{ceil}\left(\frac{W_c}{S_{\max}}\right) \\ D_{\max} = \text{ceil}\left(\frac{W_c}{S_{\min}}\right) \end{cases} \quad (2)$$

式中  $\text{ceil}$  表示向上取整;  $S_{\max}$ 、 $S_{\min}$  分别为充电站容量的上、下限;  $D_{\max}$ 、 $D_{\min}$  分别为充电站座数最大、最小值。

### 1.3 优化模型目标函数

充电站规划的经济性是投资运营者考虑的主要目标,此外充电站作为公共服务设施,用户的满意度关乎到充电站的经济收益和电动汽车的发展,而较低的用户成本是提高用户满意度的有效方法之一。该文从投资运营者和用户角度出发,以充电站的投资建设、运营维护以及用户成本总和最小化为优化目标。

$$C = \min\left(\sum_{k=1}^D (C_{\text{IN}_k} + C_{\text{OP}_k}) + C_{\text{US}}\right) \quad (3)$$

式中  $C$  为充电站的年平均综合成本最小值;  $D$  为充电站的总座数;  $C_{\text{IN}_k}$  为充电站  $k$  的建设投资年费用;  $C_{\text{OP}_k}$  为充电站  $k$  的年运营维护费用;  $C_{\text{US}}$  为平均每年的用户成本。

$$C_{\text{IN}_k} = \frac{r_0(1+r_0)^t}{(1+r_0)^t - 1} \sum_{k=1}^D N_k (S_c C_g + P_c) \quad (4)$$

式中  $r_0$  为贴现率;  $t$  为充电站规划年限;  $N_k$  为第  $k$  座充电站的充电机数量;  $S_c$  为单台充电机的占地面积;  $g$  为土地类型,  $g \in (\text{商业区、居民区、工业区})$ ;  $C_g$  为占地类型为  $g$  的单位面积土地价格;  $P_c$  为单台充电机价格。

充电站的运营维护费用主要包括充电站的设备检修维护费用、设备折旧费用和人员工资等。一般情况下,各项费用值不是很明确,可以考虑年运营维护费用按照初期投资的百分比进行计算<sup>[3]</sup>。

$$C_{\text{OP}_k} = \eta \sum_{k=1}^D N_k (S_c C_g + P_c) \quad (5)$$

式中  $\eta$  为比例因子。

每年的用户成本包括充电路程中的损耗和购电成本。充电路程中的损耗成本主要包括用户在充电路程中所产生的空驶电量和时间损耗成本。

$$C_{\text{US}} = M_1 + M_2 \quad (6)$$

$$M_1 = 365 \left( \sum_{k=1}^D L_k W_s P_s + \frac{\sum_{k=1}^D L_k}{v} P_t \right) \quad (7)$$

$$M_2 = 365 W_c P_s \quad (8)$$

式(6)~(8)中  $M_1$  为损耗成本;  $M_2$  为购电成本;  $L_k$  为第  $k$  个充电站服务范围内所有充电路径总长度;  $W_s$  为电动汽车单位长度平均耗电量;  $P_s$  为充电电价;  $v$  为电动汽车平均行驶速度;  $P_t$  为用户的时间价格。式(7)中括号内第1项表示用户空驶电量损耗成本,第2项表示用户时间损耗成本。

### 1.4 评价模型

充电站是电动汽车与电网交互的场所,随着电动汽车的快速发展,充电站建设数量逐年增加,其选址定容对配电网的网损、负荷和电压的影响越来越明显。因此,在充电站规划时,不仅要考虑建站的经济性,还应充分考虑充电站站址和容量对配电网的影响。该文建立配电网评价模型来减少充电站大量建设对配电网产生的不利影响,提高配电网效率、降低网损和最优化电力资源配置。所建立的评价模型使得配电网的网损、负荷波动率、电压偏移指标最小。

$$F = \alpha \min \sum_{t \in T} \sum_{i,j \in l} I_{ij}^2(t) R_{ij} + \beta \min f_L + \mu \min f_V \quad (9)$$

式中  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\mu$  分别为网损、负荷波动率、电压偏移指标的权重系数,总和为1;  $t$  为时段,  $T$  为所有时段的集合;  $l$  为配电系统支路集合;  $I_{ij}(t)$ 、 $R_{ij}$  分别为节点  $i$ 、 $j$  之间的电流、电阻;  $f_L$ 、 $f_V$  分别为负荷波动率和电压偏移指标。

负荷的标准差与负荷的均值之比为负荷波动率,表示单位平均负荷时的负荷分散程度。负荷分散程度越大,标准差越大,负荷波动率也越大,即负荷波动性越大;相反,负荷波动率越小,负荷越平稳。

$$f_L = \frac{1}{D} \sum_{i=1}^n \frac{S_i}{\bar{\chi}_i} y_i \quad (10)$$

式中  $f_L$  为充电站接入点的平均负荷波动率;  $n$  为配电网节点数;  $S_i$  为节点  $i$  的负荷标准差;  $\bar{\chi}_i$  为节点  $i$  的负荷均值;  $y_i$  表示节点  $i$  是否建有充电站,建有充电站为1,否则为0。

若充电站选址或定容不合理,则充电负荷大规模接入时节点电压偏差可能过大,将会导致配电网的节点电压急剧下降。充电站接入后的各节点电压偏差为

$$f_j = \frac{|V_j - V_{j0}|}{V_{j0}} \times 100\%, j \in n \quad (11)$$

式中  $f_j$  为节点  $j$  的电压偏差;  $V_j$  为加入充电负荷之后节点  $j$  的电压;  $V_{j0}$  为未加充电负荷时节点  $j$  的电压。

电压偏移指标定义为各节点电压偏差最大值,在充电站建设方案中,电压偏差最大值越小对系统电压影响越小。

$$f_v = \max\{f_1, f_2, \dots, f_{33}\} \quad (12)$$

式中  $f_v$  为电压偏移指标;  $f_1, f_2, \dots, f_{33}$  分别为 33 个节点的电压偏差。

### 1.5 约束条件

1) 系统潮流约束。

$$\begin{cases} P_i = V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (13)$$

式中  $P_i, Q_i$  分别为节点  $i$  的注入有功、无功功率;  $V_i, V_j$  分别为节点  $i, j$  的电压值;  $G_{ij}, B_{ij}$  分别为支路  $i, j$  之间的电导、电纳;  $\theta_{ij}$  为节点  $i, j$  之间的相角差。

2) 节点电压及支路功率约束。

$$\begin{cases} V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max}, i \in n \\ S_{lj} \leq S_{L_{\max}}, j \in l \end{cases} \quad (14)$$

式中  $V_i$  为节点  $i$  的电压;  $V_{\min}, V_{\max}$  分别为节点的电压上、下限;  $S_{lj}$  为第  $j$  条线路的传输功率;  $S_{L_{\max}}$  为第  $j$  条线路传输功率的上限;  $l$  是线路集合。

3) 充电站约束。

$$\begin{cases} D_{\min} \leq D \leq D_{\max} \\ S_{\min} \leq S_k \leq S_{\max} \\ L_{\min} \leq L_{ak} \leq L_{\max} \\ P_{k_{\max}} \leq P_k \\ W_{mk} \leq W_{ck} \\ W_C \leq \sum_{k=1}^D W_{ck} \end{cases} \quad (15)$$

式中  $S_k$  为第  $k$  个充电站容量;  $L_{\min}, L_{\max}$  分别为相邻充电站距离的最小、最大值;  $L_{ak}$  为充电站  $a, k$  之间的距离大小;  $P_{k_{\max}}$  为充电站  $k$  的充电负荷峰值;  $P_k$  为充电站  $k$  的配置容量;  $W_{ck}$  为充电站  $k$  提供的日充电电量;  $W_{mk}$  为充电站  $k$  服务范围内总的日充电需求。

## 2 模型求解

### 2.1 求解流程

使用遗传算法求解优化模型,染色体编码对应充电站待选站址的配电网节点号,利用迭代的方法进行选择、交叉和变异等运算来交换种群中的染色体信息,通过适应度计算,最终生成符合优化目标的染色体。适应度是衡量染色体对应规划方案好坏的关键参数,其决定着种群进化的方向,可在优化目标的基础上确定。规划流程如图 1 所示。

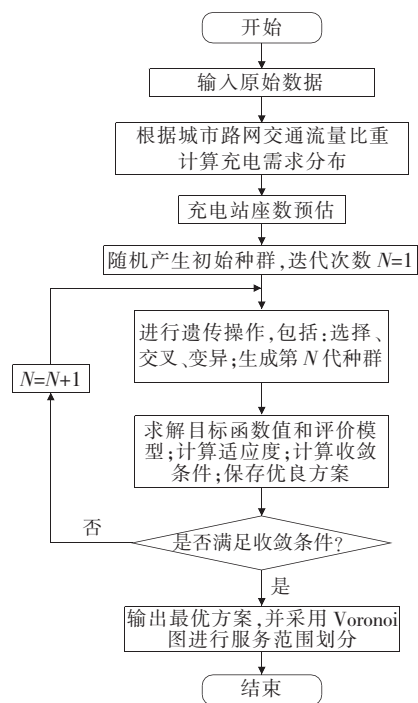


图 1 模型求解流程

Figure 1 Flow chart of model solution

### 2.2 服务范围划分

Voronoi 图又叫泰森多边形,已知方案中充电站站址,可利用 Voronoi 图划分各充电站的服务范围。假设,  $R = \{R_1, R_2, \dots, R_n\}$ ,  $3 \leq n \leq \infty$  为平面上互不相同的点,其中  $n$  为点集数, Voronoi 图定义<sup>[6]</sup>为

$$\begin{aligned} V(R_i) = & \\ \{x \in V(R_i) \mid d(x, R_i) \leq d(x, R_j), & \\ j = 2, 3, \dots, n; R_i \neq R_j\} & \quad (16) \end{aligned}$$

式中  $x$  为平面上任意一点;  $d(x, R_i)$  为点  $x$  与  $R_i$  之间的 Euclid 距离。以  $R_i$  为顶点的 Voronoi 图多

边形为 $V(R_i)$ ,其中, $R_i$ 为各站点位置, $V(R_i)$ 表示待规划区域中各站点的服务范围。

### 3 算例分析

#### 3.1 算例概况

以文献[4]中规划区为例进行电动汽车充电站规划。为简化计算,选取文献[4]中2/3的规划区作为该文规划区,将规划区分为工业、商业和居民区,然后将交通与配电网节点编号相对应,得到规划区结构如图2所示。该区域共包含路网节点32个,如图中数字序号1~32标识;路段为76段,路段长度均为1 km。认为该区域内的汽车数量处于进出动态平衡的状态,充电需求分布在路网的节点上。

采用IEEE 33节点测试系统,系统电压等级为12.66 kV,总有功、无功负荷分别为3 715 kW、2 300 kVar。当对配电系统进行潮流计算时,规划典型日等分为24个时段,即单个潮流分析时段的长度为1 h。采用功率为60 kW的快速充电桩。居民区、工商业区日充电负荷如图3所示<sup>[14,23]</sup>。

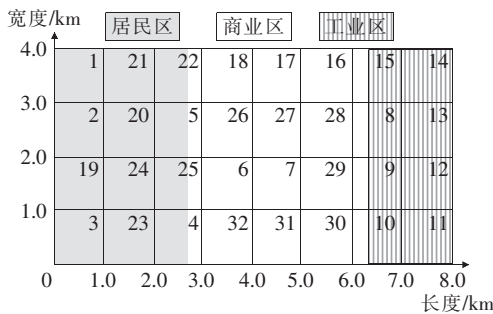


图2 规划区结构

Figure 2 Planning area structure

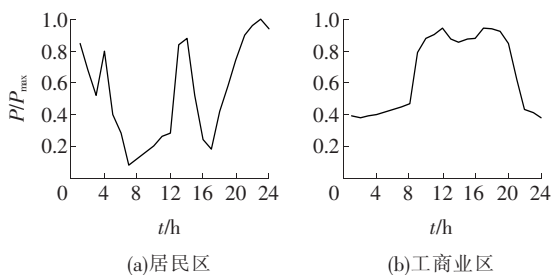


图3 居民区、工商业区日充电负荷

Figure 3 Daily charging load in residential areas, industrial and commercial areas

#### 3.2 结果分析

规划区总的日充电需求取文献[4]预测表中2025年预测值为19 200 kW·h的2/3,即12 800 kW·h。各节点车流量比重如表1所示<sup>[12]</sup>;再根据公式(1)计算出各节点的充电需求,如表2所示。

表1 各节点车流量权重

Table 1 Traffic flow weights of each node

节点号	车流量	节点号	车流量	节点号	车流量
1	0.54	12	0.34	23	0.65
2	0.80	13	0.15	24	0.34
3	1.20	14	0.35	25	0.45
4	0.87	15	0.28	26	0.93
5	1.26	16	0.60	27	1.10
6	1.70	17	0.28	28	0.54
7	1.50	18	0.37	29	0.60
8	0.94	19	0.63	30	0.32
9	0.97	20	0.55	31	0.21
10	0.95	21	0.62	32	0.34
11	0.35	22	0.55		

表2 各节点充电需求

Table 2 Charging demands of each node kW·h

节点号	充电需求	节点号	充电需求	节点号	充电需求
1	324.812	12	1 095.892	23	1 220.168
2	481.203	13	169.468	24	384.127
3	721.805	14	1 423.529	25	508.403
4	523.308	15	395.425	26	982.913
5	757.895	16	1 920.635	27	610.084
6	1 022.556	17	1 061.998	28	1 242.763
7	902.256	18	418.021	29	677.871
8	565.414	19	734.360	30	1 355.742
9	583.459	20	1 073.260	31	361.531
10	571.429	21	700.467	32	903.828
11	210.526	22	621.382		

假设充电站容量范围为[120,300],经过预估,可得到充电站的座数范围为[4,9]。其他参数设置如表3所示<sup>[4-6]</sup>;各用地类型土地价格如表4所示<sup>[19]</sup>。

一般充电站规划方法着重于建站的经济性,仅考虑充电站投资建设成本和用户成本进行最优规划,结果如表5所示。采用该文所提方法,经过计算目标函数和配电网评价模型,得到最优权重[0.1, 0.3,0.6]下的5个最优候选方案,各方案规划详情如表6所示。

表 3 模型参数设置

Table 3 Model parameter setting

$t/a$	$r_0$	$\eta$	$P_c/(万元/台)$	$S_c/m^2$
15	0.1	0.1	15	20
$W_s/(kW \cdot h/km)$	$P_l/(元/h)$	$P_s/(kW \cdot h/元)$	$v/(km/h)$	
7	25	10	20	

表 4 各用地类型土地价格

Table 4 Land price by the land type

土地类型	价格/(万元/m <sup>2</sup> )
商业用地	0.685 4
居民用地	0.211 4
工业用地	0.069 6

表 5 最优规划结果

Table 5 Results of optimal planning

方案	充电站接入点/对应接入容量(kW)	C/万元
1	3/240,5/240,7/240,8/120,10/120	135.6
2	2/240,5/240,7/240,8/120,10/120	135.6
3	2/300,6/300,27/120,8/120,10/180	137.5
4	2/240,3/240,27/300,8/120,10/180	137.7
5	4/180,5/240,7/240,8/120,10/120	137.8

表 6 不同候选方案最优规划结果

Table 6 Results of optimal planning for different alternative plans

方案	充电站接入点/对应接入容量(kW)	$f_L$	$f_V$	C/万元	F
1	3/240,5/240,7/240,8/120,10/120	25.6	1.17	135.6	0.78
2	2/240,5/240,7/240,8/120,10/120	25.5	1.14	135.6	0.76
3	2/300,6/300,27/120,8/120,10/180	25.5	1.05	144.0	0.70
4	2/240,3/240,27/300,8/120,10/180	25.0	1.10	137.7	0.74
5	2/180,3/180,4/240,27/240,8/120,10/120	30.0	1.02	144.5	0.70

从表 5、6 可以看出,2 个表中的方案 1、2 相同,且表 5 中方案 1、2 总成本均为 5 个方案中最小值。但由表 6 可知,方案 2 的负荷波动率和电压偏移指标均小于方案 1,方案 2 对配电网的影响更小,因此方案 2 为表 5 中最优方案。若没有进行配电网评

价,从表 5 中盲目选择最优方案,就很可能选择对配电网产生不利影响更大的方案 1。

由表 6 可知,方案 3、5 的评价模型数值为 5 个方案中最小值,但其成本均相对较高。方案 4 评价模型数值仅比方案 3、5 大 0.04,且其总成本仅比方案 1、2 大 2.1 万元。该文目标是在经济允许范围内选择出对配电网影响较小的方案,即方案 4 为该最优规划方案,详情如表 7 所示。

由 Voronoi 图对方案 4 进行服务范围划分,圆点所在位置 S1~S5 为 5 个充电站的初步方案,黑色实线所围成的区域为各个充电站的服务范围,包含 32 个路网节点,如图 4 所示。

表 7 方案 4 详情

Table 7 Details of plan 4

方案 4 节点	充电机台数	服务路网节点号	充电路径	网损/kW
2	4	1,2,5,20,21,22	44	137
3	4	3,4,19,23,24,25	44	137
27	5	6,7,16,17,18,26,27,28,29,31,32	44	137
8	2	8,13,14,15	44	137
10	3	9,10,11,12,30	44	137

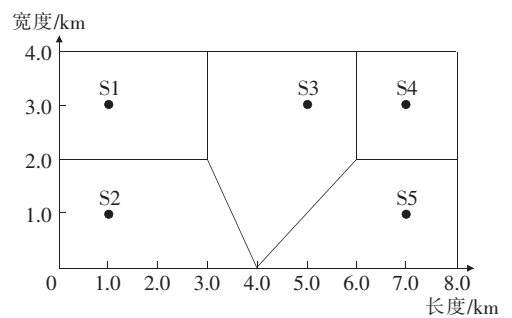


图 4 充电站布局和服务范围划分

Figure 4 Charging station layout and service scope division

## 4 结语

充电站的规划对电动汽车的推广具有至关重要的作用,合理的充电站规划布局有利于配电网稳定运行,节省社会资源。该文在满足充电需求的前提下,考虑投资运营者和用户的利益、配电网负荷波动和电压偏移对充电站进行选址定容,采用遗传算法

与 Voronoi 图对模型进行求解,结果表明:该规划模型能够合理选择出对配电网影响最小,且投资运营者成本以及用户成本较小的充电站建设方案。该在对充电站选址定容时,没有考虑分布式电源,这将作为下一阶段研究重点。

## 参考文献:

- [1] 官嘉玉,江修波,刘丽军.考虑电动汽车随机充电行为及低碳效益的充电站规划[J].电力科学与技术学报,2019,34(4):93-100.  
GUAN Jiayu,JIANG Xiubo,LIU Lijun. Optimal allocation of charging stations considering stochastic charging behavior and low carbon efficiency of electric vehicles[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019,34(4):93-100.
- [2] 曾成碧,刘广,苗虹,等.考虑城市交通流的电动汽车充电站规划[J].电力科学与技术学报,2019,34(4):101-107.  
ZENG Chengbi,LIU Guang,MIAO Hong, et al. Planning of electric vehicle charging station considering urban traffic flows[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2019,34(4):101-107.
- [3] 郭磊,王克文,文福拴,等.电动汽车充电设施规划研究综述与展望[J].电力科学与技术学报,2019,34(3):56-70.  
GUO Lei,WANG Kewen,WEN Fushuan, et al. Review and prospect of charging facility planning of electric vehicles[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2019,34(3):56-70.
- [4] 贾龙,胡泽春,宋永华.考虑不同类型充电需求的城市内电动汽车充电设施综合规划[J].电网技术,2016,40(9):2579-2587.  
JIA Long,HU Zechun,SONG Yonghua. An integrated planning of electric vehicle charging facilities for urban area considering different types of charging demands[J]. Power System Technology, 2016,40(9):2579-2587.
- [5] Su S,Hao L,David G. Optimal planning of charging for plug-in electric vehicles focusing on users' benefits[J]. Energies,2017,10(7):952.
- [6] 张永明,姚志力,李菁,等.基于配电网概率潮流计算的电动汽车充电站规划策略[J].电力系统保护与控制,2019,47(22):9-16.  
ZHANG Yongming,YAO Zhili,LI Jing, et al. Electric vehicle charging station planning strategy based on probabilistic power flow calculation of distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2019,47(22):9-16.
- [7] 范晋衡,刘琦颖,曲大鹏,等.考虑电动汽车充电负荷的配电网运行风险控制与优化[J].电网与清洁能源,2020,36(9):105-112+121.  
FAN Jinheng,LIU Qiyang,QU Dapeng, et al. Control and optimization of operation risk of distribution network considering electric vehicle charging load[J]. Power System and Clean Energy, 2020,36(9):105-112+121.
- [8] 姜欣,冯永涛,熊虎,等.基于出行概率矩阵的电动汽车充电站规划[J].电工技术学报,2019,34(S1):272-281.  
JIANG Xin,FENG Yongtao,XIONG Hu, et al. Electric vehicle charging station planning based on travel probability matrix[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2019,34(S1):272-281.
- [9] 刘洪,李荣,葛少云,等.基于动态车流模拟的高速公路充电站多目标优化规划[J].电力系统自动化,2015,39(24):56-62+79.  
LIU Hong,LI Rong,GE Shaoyun, et al. Multi-objective planning of electric vehicle charging stations on expressway based on dynamic traffic flow simulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015,39(24):56-62+79.
- [10] 周思宇,顾博,张晓勇,等.计及山地城市时空特性的充电设施最优规划[J].电网技术,2020,44(6):2229-2237.  
ZHOU Siyu,GU Bo,ZHANG Xiaoyong, et al. An optimal planning of charging facilities considering the spatial and temporal characteristics of mountainous cities[J]. Power System Technology,2020,44(6):2229-2237.
- [11] 谢超.北京不同功能区电动汽车充电站选址方法及决策支持系统[D].北京:华北电力大学,2018.
- [12] 刘柏良,黄学良,李军,等.含分布式电源及电动汽车充电站的配电网多目标规划研究[J].电网技术,2015,39(2):450-456.  
LIU Bailiang,HUANG Xueliang,LI Jun, et al. Multi-objective planning of distribution network containing distributed generation and electric vehicle charging sta-

- tions[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(2): 450-456.
- [13] 罗李子. 互动环境下分布式电源与电动汽车充电站的优化配置方法研究[D]. 南京:东南大学, 2019.
- [14] 常小强, 宋政湘, 王建华. 基于蒙特卡罗算法的电动汽车充电负荷预测及系统开发[J]. *高压电器*, 2020, 56(8):1-5.  
CHANG Xiaoqiang, SONG Zhengxiang, WANG Jianhua. Electric vehicle charging load prediction and system development based on Monte Carlo algorithm[J]. *High Voltage Apparatus*, 2020, 56(8):1-5.
- [15] 石玉东, 蒋卓臻, 高红均, 等. 促进风电消纳的配电网分布式电源与电动汽车充电站联合鲁棒规划[J]. *可再生能源*, 2018, 36(11): 62-68.  
SHI Yudong, JIANG Zhuozhen, GAO Hongjun, et al. A joint robust planning of distributed generation and electric vehicle charging stations in distribution network to promote accommodation of wind power[J]. *Renewable Energy Resources*, 2018, 36(11): 62-68.
- [16] 李斌, 张元星, 谢呵呵, 等. 电动汽车充电站谐振现象及其分析[J]. *电测与仪表*, 2019, 56(16):73-78.  
LI Bin, ZHANG Yuanxing, XIE Hehe, et al. The resonance phenomenon and analysis of electric vehicle charging station[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2019, 56(16):73-78.
- [17] 臧海洋, 舒宇心, 傅雨婷, 等. 考虑多需求场景的城市电动汽车充电站多目标规划[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(5):59-80.  
ZANG Haixiang, SHU Yuxin, FU Yuting, et al. Multi-objective planning of an urban electric vehicle charging station considering multi demand scenarios[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(5):59-80.
- [18] 贾龙, 胡泽春, 宋永华, 等. 储能和电动汽车充电站与配电网的联合规划研究[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(1): 73-84.  
JIA Long, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Joint planning of distribution networks with distributed energy storage systems and electric vehicle charging stations[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(1): 73-84.
- [19] 程杉, 吴思源, 孙伟斌. 考虑电压稳定性和充电服务质量的电动汽车充电站规划[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(7):12-21.  
CHENG Shan, WU Siyuan, SUN Weibin. Optimal planning of charging stations for electric vehicles considering voltage stability of distribution system and the quality of service[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(7):12-21.
- [20] 王辉, 王贵斌, 赵俊华, 等. 考虑交通网络流量的电动汽车充电站规划[J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(13): 63-69.  
WANG Hui, WANG Guibin, ZHAO Junhua, et al. Optimal planning for electric vehicle charging stations considering traffic network flows[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(13): 63-69.
- [21] 所丽, 唐巍, 白牧可, 等. 考虑削峰填谷的配电网集中型充电站选址定容规划[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(7): 1052-1060.  
SUO Li, TANG Wei, BAI Muke, et al. Locating and sizing of centralized charging stations in distribution network considering load shifting[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(7): 1052-1060.
- [22] 郑伟民, 任宏涛, 邓卿, 等. 计及引导型充电控制策略的电动汽车充电设施与配电系统协同规划[J]. *电力科学与技术学报*, 2019, 34(3):24-36.  
ZHENG Weimin, REN Hongtao, DENG Qing, et al. A joint planning model for the charging facilities of electric vehicles and the distribution network concerned with a guided interactive charging strategy[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2019, 34(3): 24-36.
- [23] 詹祥澎, 杨军, 韩思宁. 考虑电动汽车停泊特性的充电站-电网互动策略研究[J]. *智慧电力*, 2020, 48(9):43-50.  
ZHAN Xiangpeng, YANG Jun, HAN Sining. Station-to-grid interactive strategy considering parking characteristics of electric vehicles[J]. *Smart Power*, 2020, 48(9):43-50.