

DOI: 10.7667/PSPC171089

基于两步规划的电动汽车充换电服务设施选址方法

严俊, 严凤

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 综合考虑交通、电力双层网络的实际情况, 提出一种包含电池集中充电站、电池更换点的电动汽车充换电服务设施的两步规划及校验方法。首先, 综合考虑用户和投资运营者的成本, 构建两步规划选址模型。其次, 以用户时间成本和电池更换点运行成本最小为目标, 利用遗传算法并结合 Voronoi 图, 得到最优的电池更换点的数量、位置及其服务范围, 完成第一步规划。然后, 确定电池集中充电站站址与服务范围, 形成第二步规划选址方案。最后, 将规划区域内交通网络和电网信息相结合, 进行方案校验并判断其可行性。算例分析验证了该规划方法的有效性和实用性。

关键词: 两步规划方案; 充换电服务设施; 遗传算法; Voronoi 图; 方案校验

Location method of charging and swapping service facilities based on a two-step planning

YAN Jun, YAN Feng

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Considering the actual situation of traffic network and power network synthetically, a two-step planning and calibration method for EVs' charging and swapping service facilities including battery centralized charging station and battery swapping point is proposed. Firstly, thinking about summed costs of investors and EV users, a two-step planning model is established. Secondly, aiming at minimizing running costs of battery swapping points and users' waiting costs, the number, location and service area of battery swapping point are solved by genetic algorithm and Voronoi diagram. This is the first step in the two-step planning. And then, the second step is completed after determining the location and the service area of centralized charging stations. Finally, combining the traffic network and the grid information in the area, planning calibration is done and the feasibility of the planning scheme is judged. The feasibility and effectiveness of the method for the planning are verified through contrast calculation and reasonable analysis.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0902203).

Key words: two-step planning; charging and swapping service facilities; genetic algorithm; Voronoi diagram; planning calibration

0 引言

为缓解能源危机、减少碳排放以及减少雾霾天数, 具有绿色、高效特点的电动汽车将成为未来汽车行业的最新发展方向。电动汽车的普及进程与其及时补充电能的便利程度密切相关, 能否通过合理规划充换电服务设施布局来解决“里程焦虑”问题^[1], 是直接影响电动汽车消费者的购买意愿和用车体验的重要因素。

目前, 已有的电能补给方式有以下两种方式。第一, 建造电动汽车充电站为电动汽车充电。文献[2]通过对电动汽车充电负荷仿真, 根据负荷特性建

立了不同影响因素下充电站静态负荷模型。文献[3]利用粒子群算法和 Voronoi 图的方法对充电站的选址定容模型进行优化, 然后通过仿真得到了区域内充电站的规划方案。文献[4]依据高速公路汽车行驶特点提出动态车流模拟法, 构建了兼顾投资运营者和用户双方利益的电动汽车高速公路充电站选址定容模型。第二, 建造电动汽车换电站为电动汽车更换可用电池, 同时为电池充电。文献[5]在换电模式下针对电动公交车的出行特点, 使用排队论建模并运用邻近聚类算法求解, 形成了换电站-电池充电站的规划方法。文献[6]建立了电池更换模式下的电动汽车负荷模型, 在此基础上, 文献[7]将换电模式与充电模式下的充电负荷进行对比, 得出换电模式下的无序充电对电网的影响较小, 且其有序充电模式

可以降低充电费用以及平缓日负荷曲线波动的结论。根据上述研究, 可以看出现有的电动汽车充电站的规划具有充电负荷随机性强, 选址受到市政建设要求、交通拥堵情况以及电动汽车充电时长的影响导致其实用性不强; 电动汽车换电站的建设虽然缩短了车辆到站停留时间, 但是与充电站同样具有充电负荷随机性强、对电网影响较大^[8-9]的不足。为缩短用户获得电能的时间, 降低充电行为的随机性, 本文受“批发-零售”思想启发, 通过分离换电模式下的充换电部分, 采用电池更换站为用户提供换电服务, 同时另设电池集中充电站为待充电池充电。

基于该模式, 文献[10]针对电网削峰填谷效果提出了以集中充电站的经济性最优为目标的规划模型。文献[11]建立了充、换电双层网络模型, 根据辐射范围和交通密集点分布情况, 为集中充电站和换电站选址。文献[12]综合考虑电网和交通网实情, 建立了集中充电站的选址定容模型。然而, 以上研究未从用户角度出发考虑社会综合成本, 忽略了用户行驶至更换点的换电成本; 忽略了电池集中充电站中大规模电池充电行为对电网造成的影响; 忽略了根据交通网络或其他因素确定的选址方案在电网中是否可行。

本文提出了双层网络约束下的充换电服务设施两步规划选址模型。根据城市路网交通流量、各方面成本确定电池更换点的地址、服务范围和服务设施数量, 以此作为第一步规划; 确定电池集中充电站的地址、服务范围和服务设施数量, 以此作为第二步规划。两步规划方案形成后, 根据电网运行实际情况, 将电池集中充电站的位置与电网结构相对应, 校验其作为恒定负荷接入电网是否影响电网的正常运行并判断方案的可行性。

1 运营模式及双层网络的说明

为降低用户购车成本、提高电池利用率并减少随机充电带来的电网波动^[13], 本文对充换电服务设施的规划围绕由电池集中充电站和电池更换点相配合的运营模式开展。该模式下的充换电服务设施由作为充电设施的电池集中充电站和作为换电设施的电池更换点两个部分组成, 其运营模式如图 1 所示。

实现图 1 中所示的运营模式分为以下三个部分。

1) 根据交通情况, 由电池集中充电站内配备的电池运输车将可用电池根据不同需求运送至各个电池更换点。

2) 运输车将待充电池运送至电池集中充电站

进行充电, 并等待下一次向电池更换点配送电池。

3) 有换电需求的用户可就近行驶至电池更换点, 经自动换电装置更换电池。

双层网络结构由交通网络和电力网络组成。电池集中充电站作为联络枢纽分别在双层网络中拥有相应的节点位置, 这就要求电池集中充电站的选址既要满足交通网络中的换电需求, 又要在作为较大负荷接入电网时不影响电网的安全运行。

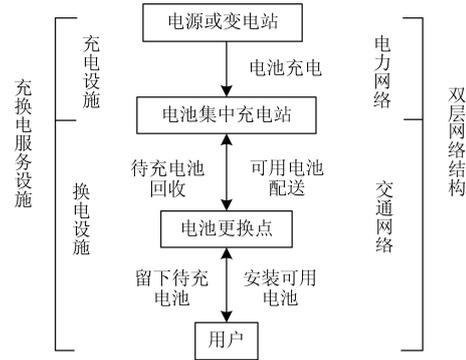


图 1 运营模式与网络结构图

Fig. 1 Operation mode and network structure

2 充换电服务设施两步规划模型

2.1 数学模型

针对电动汽车充换电服务设施进行两步规划选址, 其数学模型为

$$F = \min \sum_{i=1}^m F_{M_i} + \min \sum_{j=1}^n F_{N_j} \quad (1)$$

式中: F 为折算至规划年的社会综合成本总和; 规划区域内有 m 座电池集中充电站和 n 个电池更换点; F_{M_i} 为折算至规划年第 i 座电池集中充电站的总费用; F_{N_j} 为折算至规划年第 j 个电池更换点的总费用; $\min \sum_{j=1}^n F_{N_j}$ 为所有电池更换点费用之和最小值;

$\min \sum_{i=1}^m F_{M_i}$ 为在确定电池更换点位置的基础上, 所有电池集中站费用之和最小值。

$$F_{M_i} = (C_{F_i} + E_i a + R_i b) \cdot \frac{r_0(1+r_0)^{\tau_i}}{(1+r_0)^{\tau_i} - 1} + \sum_{j=1}^n D_F \cdot d_{ij} \cdot E_j \cdot 365 \quad (2)$$

式中: 等号右边的第一部分表示电池集中充电站 i 建设投资年费用, 其中 C_{F_i} 为电池集中充电站 i 的基础建设费用; E_i 为集中充电站 i 内电池台数; a 为

折算至规划年电池的购买单价； R_i 为配送电池车数量； b 为配送车单价； r_0 为贴现率； z_1 为集中充电站 i 的运行年限。第二部分表示集中充电站 i 的年电池配送成本，其中 D_f 表示每台电池配送成本； d_{ij} 为经过折算后电池集中充电站 i 到其服务范围内电池更换点 j 的距离； E_j 为用户的日平均电池需求，求取如式(3)所示。

$$E_j = \sum_{k=1}^{n_j} \rho \int_0^{24} \alpha \cdot \varphi(k, t) dt \quad (3)$$

式中： α 为电动汽车在交通网络中的渗透率； ρ 表示用户的换电比例； n_j 为电池更换点 j 服务范围内包含的路网节点个数。同时，可用路网节点交通流量来表示交通网络中的车流量^[14]， $\varphi(k, t)$ 为路网节点 k 每小时的车流总量，如式(4)所示。

$$\varphi(k, t) = \sum_{f=1}^r \phi_t^f [k, k(f)], f \in (1, r), \text{且为正整数} \quad (4)$$

对路网节点 k 来说，与之相连的第 f 个路网节点用 $k(f)$ 来表示，与之相连的路段数为 r ， t 时段内路段的交通流量可用 $\phi_t^f [k, k(f)]$ 表示。

$$F_{N_j} = \left(T_j d + Z_j h + C_{F_j} \right) \cdot \frac{r_1 (1+r_1)^{z_2}}{(1+r_1)^{z_2} - 1} + \left(\frac{\sum_{k=1}^x y_{jk}}{u} \cdot p + \frac{\sum_{k=1}^x y_{jk}}{v} \cdot \theta \right) \times 365 \quad (5)$$

式中：各部分均为与电池更换点 j 相关的参数，等号右边第一部分为折算至规划年的总建设投资费用； T_j 表示换电服务台数； d 为建成单个换电服务台的费用； Z_j 为自动换电装置的数量； h 为折算至规划年每台自动换电装置的单价； C_{F_j} 为基础建设成本； r_1 为贴现率； z_2 为运行年限。等号右边第二部分为用户的换电成本， x 为可接受服务的路网节点数； u 为单位距离内用户行驶的耗电量； p 为单位耗电量的成本； v 为用户的平均行驶速度； q 为用户耗费的时间成本； y_{jk} 为经过折算后路网节点 k 到所属服务范围内的更换点 j 的距离总和，可用式(6)表示。

$$\sum_{k=1}^n y_{jk} = \sum_{k=1}^n L_{jk} \cdot q_k \quad (6)$$

式中， q_k 为第 k 个路网节点接受换电服务的用户数量。

2.2 换电服务台数量的确定

用户换电的便捷度与用户到达电池更换点后等待接受服务的时间长短有关，因此确定更换点内换电服务台数至关重要。由于用户到达电池更换点更换电池的时间和到达人数是随机的，因此可用排队论^[15]来分析该随机服务系统。

$$\begin{cases} P_0 = \left[\sum_{k=0}^{c-1} \frac{1}{k!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^k + \frac{1}{c!} \cdot \frac{1}{\rho} \cdot \frac{1}{1-\rho} \cdot \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^c \right]^{-1} \\ P_n = \begin{cases} \frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^n \cdot P_0, & (n \leq c) \\ \frac{1}{c!} \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^n}{c^{n-c}} \cdot P_0, & (n > c) \end{cases} \end{cases} \quad (7)$$

式中： ρ 为系统服务强度； P_n 为接受服务的用户数目为 n 时的概率； c 表示换电服务台数量，其只能取整数； λ 表示平均每小时到达电池更换点的辆数； μ 为平均服务率，取值为0.15；用户在排队时的等待队长平均值 L_s 为

$$L_s = \frac{(c\rho)^c \rho}{c!(1-\rho)^2} \cdot P_0 + \frac{\lambda}{\mu} \quad (8)$$

换电服务台数过少会造成用户排队时间长、等待成本增加，而过多的台数又会使成本增加，因此建立如式(9)所示目标函数。

$$\min Z(c) = S_c \cdot c + c_w \cdot L_s \quad (9)$$

式中： S_c 为换电服务台的运行成本； c_w 为每小时内用户的等待成本。目标函数满足的边界约束条件为

$$\begin{cases} Z(c') \leq Z(c'-1) \\ Z(c') \leq Z(c'+1) \end{cases} \quad (10)$$

联立式(8)一式(10)，可由式(11)求得最优值 c' 。

$$L(c') - L(c'+1) \leq \frac{S_c}{c_w} \leq L(c'-1) - L(c') \quad (11)$$

受城市出行规律的影响，车辆换电需求的产生多发生在16:00—20:00，约占一天中总量的40%^[16]，假设进站车辆换电需求均能满足， λ 的取值为

$$\lambda = \frac{E_j \times 40\%}{4} \quad (12)$$

2.3 服务范围的划分

当方案中各站点地址已知，可利用Voronoi图求解服务范围。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图定义为

$$V(R_i) = \left\{ x \in V(R_i) \mid d(x, R_i) \leq d(x, R_j), j = 2, \dots, n; R_i \neq R_j \right\} \quad (13)$$

式中: x 为平面上任意一点; $d(x, R_i)$ 表示点 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。

2.4 双层网络下的约束条件及校验方法

确定的两步规划选址的最终方案必须同时满足双层网络下的约束条件。

2.4.1 交通网络下的约束条件

$$\sum_{i=1}^M B_i \geq \sum_{j=1}^N E_j \quad (14)$$

左边的 $\sum_{i=1}^M B_i$ 为充换电服务设施可提供的电池总数目, 不等式说明了电池供给量必须满足交通网络中电池需求量。

$$I_0 = 1 - \frac{\lambda}{c\mu} \geq 0 \quad (15)$$

式中, I_0 为换电服务台的空闲比例。该式说明了电池更换点中服务强度的约束。

2.4.2 电力网络下的约束条件

$$\Delta U = \frac{U_{ref} - U}{U_{ref}} \times 100\% \quad (16)$$

式中: ΔU 为电压偏移; U 为电压测量值; U_{ref} 为网络标称电压; 电池集中充电站接入电网后的电压偏移应服从电能质量中的供电电压偏差约束, 即 35 kV 及以上供电电压正、负偏差绝对值之和不超过标称电压的 10%^[17]。

2.4.3 校验方法

本文中的电池集中充电站与 110 kV 变电站相连, 作为较大功率的负荷接入电网将会对电网的潮流分布产生影响, 出现局部越限情况。从方案的安全性与实际可行性出发, 需要进行校验。两步规划方案形成后, 电池集中充电站的站址坐标和服务范围已求出。城市电网的负荷节点有具体的地理位置, 电池集中充电站与其所在城市电网相连接, 因此根据交通网络中的坐标位置可知每个电池集中充电站对应的电网中的位置, 根据服务范围中包含的路网节点的车流情况可以计算出各站的功率, 将其作为新增负荷加入电网, 并通过 matpower6.0 进行仿真, 分析接入前后电压幅值, 根据式(16)和国家标准进行校验, 判断方案的可行性。

3 规划模型的求解

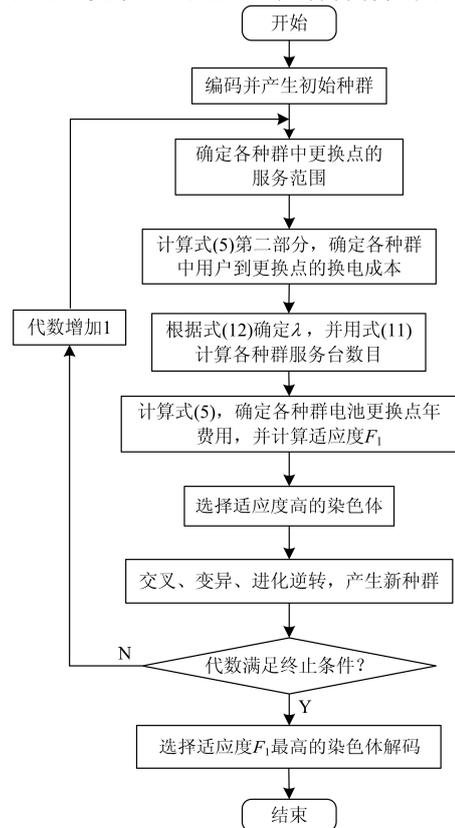
3.1 充换电服务设施数量区间预估

将备选站点的数量控制在合理的区间内, 在优化站址时有利于产生长度合理的染色体, 同时可减少迭代次数, 增加运算速度。

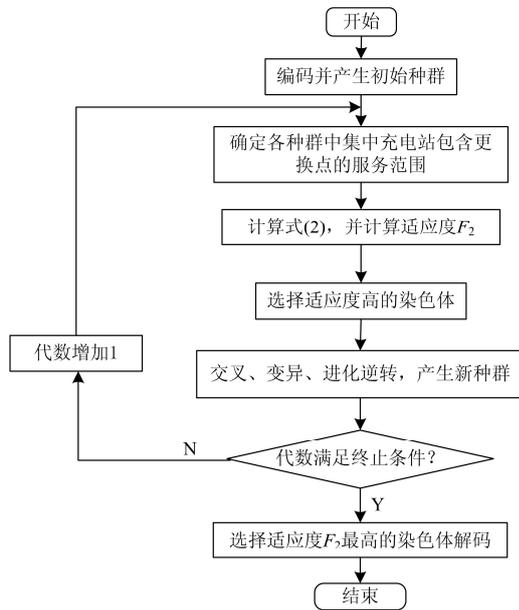
给定面积的区域每个电池更换点的服务范围面积的大小决定了电池更换点的数量 N , 其数量区间 $N \in [N_{min}, N_{max}]$ 由其最大、最小服务范围^[18]决定。集中充电站的服务范围由接受该集中充电站电池配送的多个电池更换点划分, 因此可用 N_{min} 、 N_{max} 来确定电池集中充电站的数量区间, 则最终的集中充电站数量 $M \in [M_{min}, M_{max}]$ 。

3.2 遗传算法的应用

使用遗传算法对本文中建立的两步规划选址模型求解, 定义每个染色体为待选站址的纵横坐标, 利用迭代的方法进行选择、交叉或者变异等运算来交换种群中的染色体信息, 并通过适应度计算, 最终生成符合优化目标的染色体。其中适应度为 $F_1 = \frac{1}{F_{N_j}}$ 、 $F_2 = \frac{1}{F_{M_i}}$ 。运用遗传算法优选电池集中充电站和电池更换点的地址, 具体操作如图 2 所示。



(a) 第一步电池更换点地址的优选



(b) 第二步电池集中充电站的地址优选流程图
 图 2 遗传算法在两步地址优选中的流程图
 Fig. 2 Flow chart of local address optimization by genetic algorithm

综上所述, 两步规划选址的求解流程如图 3 所示。

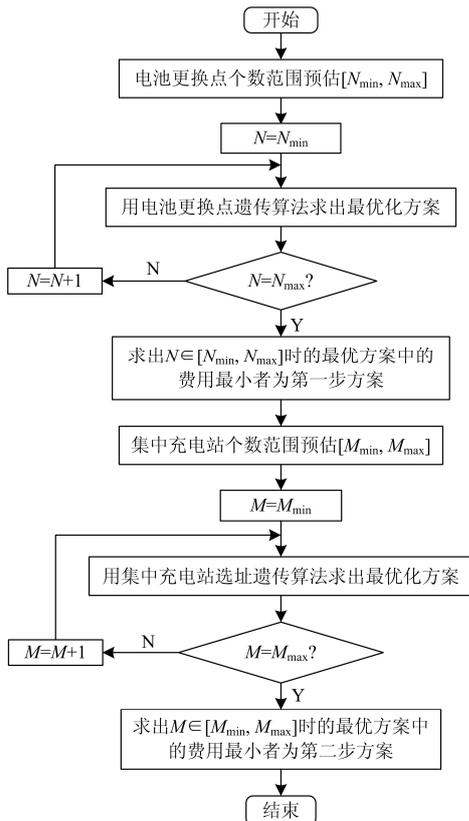


图 3 两步规划选址流程
 Fig. 3 Flow chart of the two-step planning

4 算例

4.1 规划方案的确定

现以某市区为例进行充换电服务设施的两步规划选址和校验。如图 4 所示, 不规则蓝色线条为该城原有道路, 经过合理的近似将其栅格化^[19], 其中 1~64 的标号分别表示 64 个路网节点的序号。规划区域面积为 88 km²。

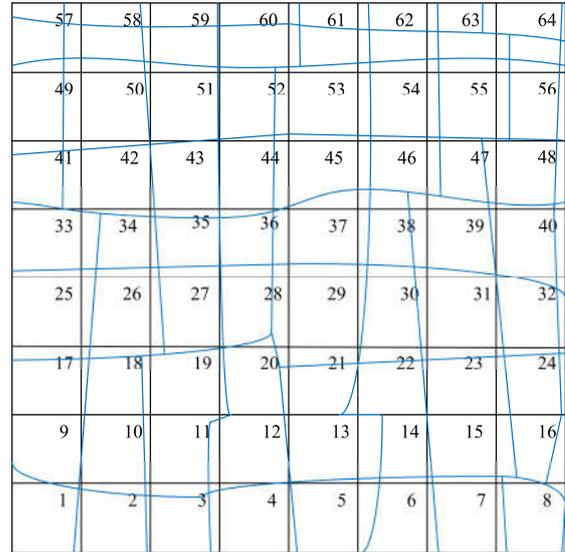


图 4 城市路网结构示意图
 Fig. 4 Regional road network structure

表 1 中的日均车流量分布信息可由蒙特卡洛的随机抽样和式(3)、式(4)换算得到。

表 1 日均车流量分布信息表

Table 1 Distribution of traffic flow in an average day

网点	车流量								
1	5 150	14	6 997	27	6 739	40	5 976	53	5 728
2	5 782	15	4 786	28	7 880	41	3 303	54	6 438
3	4 621	16	5 689	29	8 131	42	5 499	55	5 375
4	5 006	17	5 751	30	7 599	43	6 118	56	4 917
5	4 213	18	6 604	31	6 900	44	6 960	57	3 735
6	2 889	19	6 811	32	6 012	45	7 739	58	3 686
7	6 432	20	7 235	33	4 724	46	7 498	59	5 379
8	6 867	21	7 387	34	5 099	47	6 522	60	6 468
9	6 564	22	6 901	35	5 857	48	4 196	61	5 589
10	5 019	23	6 592	36	7 328	49	4 035	62	4 947
11	6 134	24	5 736	37	8 493	50	4 413	63	4 275
12	5 841	25	5 558	38	8 838	51	4 518	64	3 839
13	6 303	26	5 967	39	6 147	52	5 991	-	-

两步规划选址模型中目标函数相关参数的取值可设置为表 2 所示。

表 2 两步规划选址模型的相关变量的取值

Table 2 Variable values about two-step planning model

参数	取值	参数	取值	参数	取值
d	40 万元/个	θ	25 元/h	a	2 万元/台
h	30 万元/台	S_c	50 元/h	z_1	15
v	20 km/h	c_w	25 元/h	r_1	0.08
p	10 kWh/元	α	50%	b	30 万元/辆
u	7 kWh/km	β	10%	r_0	0.1

经过预估, 可以得知电池更换点的数量区间为 [7, 16]。表 3 所示为该数量区间内不同电池更换点的数目对应的不同总换电服务台数的信息。其中, 首先由式(3)、式(4)和式(12)求得 λ , 再由式(9)一式(11)配合表 2 中相关变量的取值, 可得到总换电服务台数 c' 。

表 3 不同方案中的换电服务台数

Table 3 Total swapping services number in different plans

更换点个数	换电服务台数	更换点个数	换电服务台数
7	117	12	130
8	119	13	133
9	122	14	134
10	123	15	136
11	128	16	139

随电池更换点个数的增加, 如图 5 所示。绿色曲线代表的用户年换电行驶成本逐渐减少, 且曲线陡度逐渐减小; 红色曲线代表的电池更换点年基建成本逐渐上升; 蓝色曲线代表的电池更换点年费用先减少再增加, 并在电池更换点为 14 个时达到最小值。电池更换点由 7 个增至 14 个时, 两费用总和逐渐减小, 而换电点由 14 个增至 17 个时, 用户换电成本的降幅大于基建成本的增速, 两费用总和增大。所以, 当建设 14 座电池更换站时, 年费用总和最少, 双方成本最低。

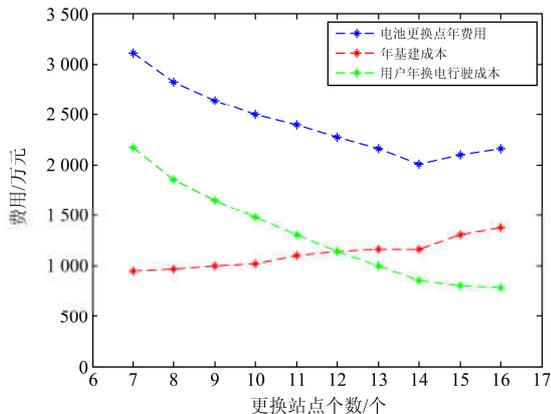


图 5 不同数量电池更换点下的成本变化趋势图

Fig. 5 Trend of cost change in different number of battery swapping points

经过对规划模型的优化求解和 Voronoi 图的运用, 可得到如图 6 所示的结果: 圆点所在位置为 A-N 14 个电池更换点的初步方案, 蓝色曲线所围成的区域为各个电池更换点的服务范围, 网格为 64 个路网节点。

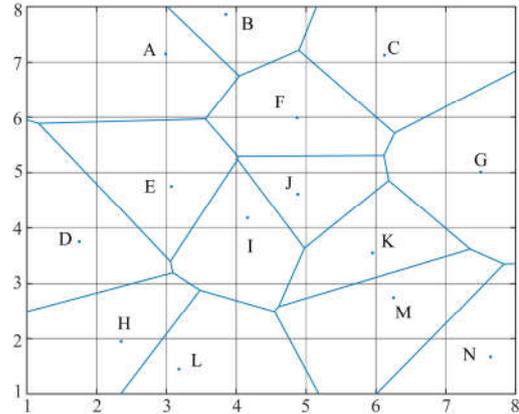


图 6 电池更换点的信息示意图

Fig. 6 Information about battery switching points

每个电池更换点服务范围内包含的路网节点已知, 并根据各个路网节点的车流量, 得到各个电池更换点的车流信息统计, 如表 4 所示。

表 4 电池更换点的服务范围及车流量统计

Table 4 Service areas and traffic statistics in each battery swapping point

编号	总车流量	编号	总车流量	编号	总车流量
A	29 189	F	27 925	K	21 886
B	23 427	G	28 853	L	25 815
C	29 791	H	29 326	M	29 682
D	28 604	I	22 443	N	29 510
E	23 813	J	25 462		

如图 7 所示, 随着集中充电站的建设数目的增多, 红色曲线代表的年基建投资成本逐渐增大, 绿色曲线代表的年电池配送成本逐渐减少, 蓝色曲线代表的电池集中充电站年费用先快速减少后缓慢增加并于集中充电站个数为 4 时达到最低点。集中充电站由 1 座增至 4 座时, 电池配送成本大幅下降, 年基建成本稳定增长, 因此两费用的和总体呈下降趋势; 当集中充电站由 4 座增至 6 座时, 电池配送成本的减少趋势由于服务设施密度高而趋于平稳, 而基建成本增加, 使得图中年费用增大。所以, 确定建设 4 座电池集中充电站, 使年费用最少, 双方成本最低。

经过对规划模型的优化求解并运用 Voronoi 图进行划分, 其结果可见图 8。红色点所在位置为 s1-s4 的 4 个电池集中充电站; 蓝色点所在位置为 A-N 的 14 个电池更换点。需要特别说明的是, 将电池更换

点设立在道路沿线更符合实际情况，因此对初步方案中的位置做合理的近似，对比图 6 可知各点的位移均在可忽略范围之内；电池集中充电站和电池更换点相连接的黑色线段为该站到所服务的各个电池更换点的配送路径。

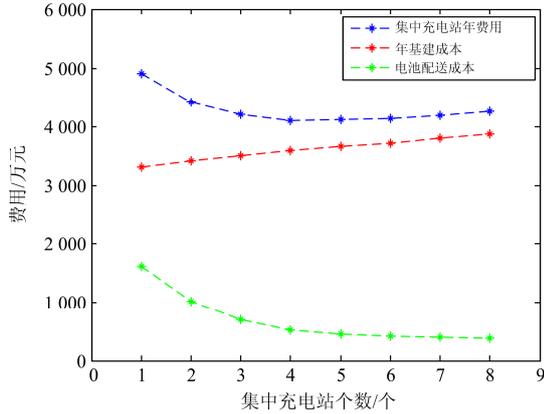


图 7 不同数量集中充电站下的成本变化趋势图
Fig. 7 Trend of cost change in different number of centralized charging stations

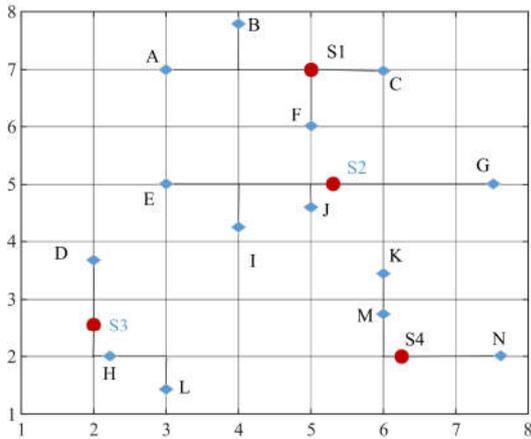


图 8 集中充电站分布与电池配送路径示意图
Fig. 8 Distribution of centralized charging station and path of battery transportation

电池集中充电站的数目、具体位置、各自的服务范围、电池配送路径如图 8 所示。至此，该规划区域内基于交通信息综合考虑电池集中充电站与电池更换点的两步规划选址方案完成，以下进行电网中的校验。

4.2 规划方案的校验

根据 IEEE-30 节点图，假设该城市的电力网络结构与之相同。如图 9 所示，各节点电压均为 110 kV，节点 1 为平衡节点，以北汽新能源 E150 电动汽车为例，其单车电池充电功率为 3.3 kW。

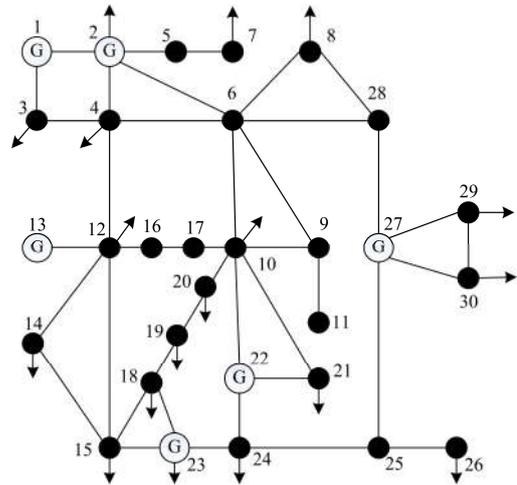


图 9 电力网络结构
Fig. 9 Structure of grid network

每个集中充电站服务范围内包含的电池更换点在 4.1 节中求得，并根据各个路网节点的车流量，可得到各个电池集中充电站的车流信息，如表 5 所示。

表 5 待校验站址信息

Table 5 Information of candidate stations

编号	电力网络节点	服务范围内的车流总量	新增负荷/MW
S1	4	82 407	27.19
S2	10	100 571	33.19
S3	18	83 745	27.64
S4	24	81 078	26.76

将电池集中充电站在交通路网中的坐标与城市电网的位置相对应，得到各电池集中充电站接入的节点编号。通过仿真，将电池集中充电站接入带来的新增负荷加入对应的节点，分析接入前后电压幅值的变化，其结果如图 10 所示。

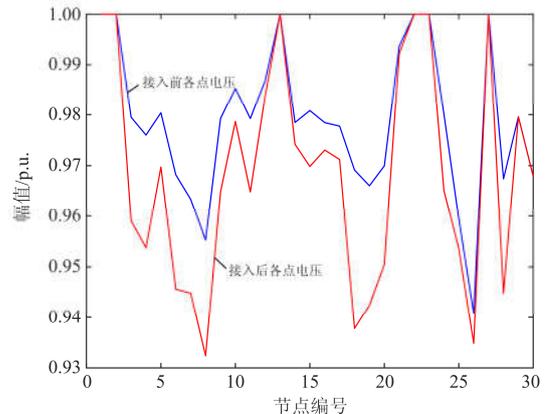


图 10 集中充电站接入前后电压幅值变化图
Fig. 10 Amplitude change of voltage after charging in battery centralized charging station

蓝色曲线表示集中充电站接入前各节点的电压幅值曲线;红色曲线表示集中充电站接入后的各节点的电压幅值曲线。根据前文所述标准,接入电池集中充电站后,各节点的潮流稳态电压值符合要求,故方案可行。

5 结论

在“集中充电,统一配送”的模式下,本文提出约束于双层网络结构的电动汽车充换电服务设施的两步规划选址和校验方法。规划方法综合考虑了基建投资成本、电池配送成本和用户的换电成本,兼顾了充换电服务提供者和换电服务接受者的利益,确定了可达到全局最优的两步充换电服务设施布置方案。同时,校验方法中通过对电网产生的影响判断方案是否可行,使规划方案具有实际意义。然而,当校验表明该规划不符合电网运行标准时,本文并没有提出相应的修正措施和再规划方案,这将作为下一阶段研究的重点。

参考文献

- [1] 段庆,孙云莲,张笑迪,等.电动汽车充电桩选址定容方法[J].电力系统保护与控制,2017,45(12):88-93.
DUAN Qing, SUN Yunlian, ZHANG Xiaodi, et al. Location and capacity planning of electric vehicles charging piles[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(12): 88-93.
- [2] 胡宇航,皮一晨,崔静安,等.电动汽车充电站负荷建模研究[J].电力系统保护与控制,2017,45(8):107-112.
HU Yuhang, PI Yichen, CUI Jingan, et al. Research on electric vehicle charging station modeling[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 107-112.
- [3] 肖波.电动汽车充电站规划研究[D].长沙:湖南大学,2014.
XIAO Bo. Research on the planning of electric vehicles charging stations[D]. Changsha: Hunan University, 2014.
- [4] 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.
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.
- [5] 钱斌,石东源,谢平平,等.电动公交车换电站—电池充电站优化规划[J].电力系统自动化,2014,38(2):64-69.
QIAN Bin, SHI Dongyuan, XIE Pingping, et al. Optimal planning of battery charging and exchange stations for electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(2): 64-69.
- [6] 罗卓伟,胡泽春,宋永华,等.换电模式下电动汽车电池充电负荷建模与有序充电研究[J].中国电机工程学报,2012,31(32):1-10.
LUO Zhuowei, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Study on charging load modeling and coordinated charging of electric vehicles under battery swapping modes[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 31(32): 1-10.
- [7] 高赐威,吴茜,薛飞,等.换电模式下电动汽车电池组需求规划[J].电网技术,2013,37(7):1783-1791.
GAO Ciwei, WU Xi, XUE Fei, et al. Demand planning of electric vehicle battery pack under battery swapping mode[J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 1783-1791.
- [8] 刘月贤,王天钰,杨亚宇,等.电动汽车充放电系统建模与仿真[J].电力系统保护与控制,2014,42(13):70-76.
LIU Yuexian, WANG Tianyu, YANG Yayu, et al. Modeling and simulation of electric vehicles' charge and discharge system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(13): 70-76.
- [9] 佟晶晶,温俊强,王丹,等.基于分时电价的电动汽车多目标优化充电策略[J].电力系统保护与控制,2016,44(1):17-23.
TONG Jingjing, WEN Junqiang, WANG Dan, et al. Multi-objective optimization charging strategy for plug-in electric vehicles based on time-of-use price[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 17-23.
- [10] 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.
- [11] 杨铎,申永涛,丁冬,等.基于双网络结构的电动汽车充换电网络二次分区规划方法[J].中国电力,2016,49(10):153-158.
YANG Duo, SHEN Yongtao, DING Dong, et al. Methodology for electric vehicle charging and discharging network planning based on a dual network structure by twice partition[J]. Electric Power, 2016, 49(10): 153-158.
- [12] 高赐威,张亮,薛飞,等.考虑集中型充电站定址分容的电网规划研究[J].中国电机工程学报,2012,32(7):40-46,189.

- GAO Ciwei, ZHANG Liang, XUE Fei, et al. Grid planning considering capacity and site of large-scale centralized charging stations[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 40-46, 189.
- [13] 孙近文, 万云飞, 郑培文, 等. 基于需求侧管理的电动汽车有序充放电策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 64-69.
- SUN Jinwen, WAN Yunfei, ZHENG Peiwen, et al. Coordinated charging and discharging strategy for electric vehicles based on demand side management[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 64-69.
- [14] 葛少云, 冯亮, 刘洪, 等. 考虑车流信息与配电网容量约束的充电站规划[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 582-589.
- GE Shaoyun, FENG Liang, LIU Hong, et al. Charging station planning considering traffic flow and capacity of distribution network[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 582-589.
- [15] 张帝, 姜久春, 张维戈, 等. 电动出租车充电桩优化配置[J]. 电工技术学报, 2015, 30(18): 181-188.
- ZHANG Di, JIANG Jiuchun, ZHANG Weige, et al. Optimal configuration of charging spots for electric taxis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(18): 181-188.
- [16] 郭艳东. 城市电动汽车充电站规划研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- GUO Yandong. Research on the layout of charging station for electric vehicle in the city[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [17] 电能质量供电电压偏差: GB/T12325—2008[S]. 北京: 国家技术监督局, 2008.
- Power quality-deviation of supply voltage: GB/T12325—2008[S]. Beijing: China State Bureau of Technical Supervision, 2008.
- [18] 许庆强, 寇英刚, 马建伟, 等. 电动汽车充换电设施典型设计方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 118-124.
- XU Qingqiang, KOU Yinggang, MA Jianwei, et al. Research on typical design scheme of charging/battery swap infrastructure for electric vehicle[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 118-124.
- [19] 陈光, 毛召磊, 李济沅, 等. 计及碳排放的电动汽车充电站多目标规划[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(17): 49-53.
- CHEN Guang, MAO Zhaolei, LI Jiyuan, et al. Multi-objective optimal planning of electric charging stations considering carbon emission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(17): 49-53.

收稿日期: 2017-07-18; 修回日期: 2017-11-13

作者简介:

严俊(1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为配电网规划; E-mail: 594764469@qq.com

严凤(1965—), 女, 博士, 硕士研究生导师, 研究方向为配电网规划。

(编辑 魏小丽)