DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.04.016

考虑用户便捷性和配网接纳能力的 EV 充电站选址定容

徐荆州[1]，葛磊蛟[2]，杨昌海[3]，张玮亚[1]
(1. 国网江苏省电力有限公司南京供电分公司,江苏 南京 210019;2. 天津大学电气自动化与信息工程学院,天津 300072;3. 国网甘肃省电力公司经济技术研究院,甘肃 兰州 730050)

摘　要:充分考虑规模化电动汽车(EV)使用过程中受限于交通便利性、接入过程中不宜超过配电网接纳能力的问题,提出一种区域范围内 EV 充电站选址定容优化规划方法。首先,应用蒙特卡罗方法分析有序、无序充电 2 种不同场景下 EV 接入配电网的负荷需求特点;其次,构建考虑交通便利性和配电网接纳能力的 EV 充电站选址定容优化模型,并应用粒子群和 Voronoi 相结合的方法对其进行求解,先后实现区域范围内 EV 充电站选址确定、充电站内充电桩个数优化;最后,通过典型的北方城区实际案例,验证所提优化规划模型的合理性,以期为我国 EV 充电站的规划建设提供借鉴。

关键词:配电网;电动汽车(EV);充电站;优化规划;粒子群
中图分类号:TM154.2　**文献标志码:**A　**文章编号:**2096-3203(2020)04-0112-08

0　引言

近年来,电动汽车(electric vehicle,EV)在缓解石油危机、减少二氧化碳排放等方面作用显著,逐渐形成了规模化接入配电网的趋势。但其接入配电网具有点多面广、分散无序、随机性强的特点,为满足 EV 用户充电需求,如何在区域范围内进行 EV 充电站和站内充电桩的合理规划建设,有待深入研究。

国内外学者在 EV 接入电网规划方面进行了一些研究。文献[1]考虑用户出行的便捷和充电站运营商的利益,提出一种 EV 充电站最优规划模型,从充电站运营商视角获得较好的投资回收率,但未考虑配电网接纳能力限制。文献[2]分析了含车载充电的 EV 在高渗透率接入条件下,对小区级配电网可靠性的影响,分析了 EV 随机负荷与配电网接纳能力的关系。文献[3]为有效削峰填谷、平抑负荷波动,提出了一种 EV 充电起始时间随机选取方法,实现基于 EV 的电网动态需求响应。文献[4]提出了一种有利于减轻用户出行焦虑的 EV 充电路径规划方法,实现充电用户的出行路线优化。文献[5]针对城市 EV 充电站规划布局及服务范围划分的问题,提出一种基于变权 Voronoi 图和混合离散粒子群算法的优化算法。另有一些学者从 EV 接入对配电网的可靠性影响[6—8]、环境因素影响[9]、运营成本以及结合 EV 构建微电网、综合能源系统等方面,提出了一些优化规划方法[10—17]。总体而言,学者们大多立足于电网视角,较少同时考虑用户使用的便捷性和电网的安全性。

为实现 EV 用户充电的便捷性和规模化 EV 接入配电网后运行的安全性,文中首先应用蒙特卡罗方法分析了有序、无序充电 2 种不同场景下 EV 接入配电网的负荷需求特点;其次,构建了一种考虑交通便利性和配电网接纳能力的 EV 充电站选址定容优化规划模型,并应用粒子群和 Voronoi 相结合的方法对其进行求解,实现区域范围内 EV 充电站选址确定以及每个充电站内充电桩的个数优化。最后,通过典型的北方城区实际案例,验证了模型的合理性,以及粒子群和 Voronoi 相结合方法的优越性。

1　EV 充电需求分析

1.1　蒙特卡罗方法

蒙特卡罗方法是一种以抽样调查获取统计值,并对未知量进行推算的计算方法,其基本思想是:对于基本的随机变量 $X=(x_1,x_2,\cdots,x_n)$,概率密度函数为 $f(x)$,其对应系统的某一个事件状态函数为 $Y=g(x)$。将随机样本序列 X,代入函数 $Y=g(x)$ 中,若 $Y<0$,则记为模拟的事件不发生;若总的模拟次数为 N,发生的次数为 n_f,则事件发生的概率的估计值为 $P_f=n_f/N$,当模拟次数足够多时,其结果越靠近事件概率值。

文中按照无序、有序充电 2 种不同模式,对 EV 的充电行为进行蒙特卡罗分析。依据 EV 充电时刻、充电时长构建数组,并将这些数据随机排列,抽样次数为 N,统计 EV 的日充电负荷曲线。

收稿日期:2020-01-03;修回日期:2020-02-15
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51807134)

1.2 无序充电模式下的充电负荷分析

在无序充电模式下,单台 EV 快速充电时的负荷曲线近似为[1]:

$$f_q(x) = ae^{[-(x+b)^2/c^2]} + de^{[-(x+e)^2/f^2]} \tag{1}$$

式中:a 取 0.160 9;b 取-15.02;c 取 3.523;d 取 0.04;e 取-19.67;f 取 2.874。

根据国家能源局发布的《电动汽车充电基础设施建设规划》数据可知,到 2020 年,新能源汽车将达 500 万辆。以 1 辆车对应 1 个慢充充电桩、0.2 个快充充电桩为例,应用蒙特卡罗方法进行 EV 充电需求分析,得到 500 万辆 EV 快充的日充电负荷曲线,如图 1 蓝色曲线所示。

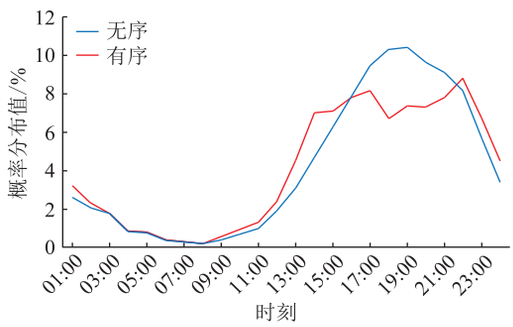

图 1 EV 日充电负荷曲线

Fig.1 Daily charging load curve of EV

由图 1 蓝色曲线可知,EV 充电负荷概率分布具有典型的峰谷特征,其谷值在 03:00—12:00,峰值主要集中在 16:00—22:00,尤其在 17:00—21:00 充电负荷急剧增加,正好与电网居民用电负荷的峰值重叠,任其发展将进一步增加电网峰谷差率。同时,为满足数量如此巨大的 EV 用户充电需求,所需投入建设的充电站将更加庞大,因此合理规划非常必要。

1.3 有序充电模式下的充电负荷分析

在 1.2 节的基础上,应用蒙特卡罗法模拟获得 500 万辆无序充电下的负荷曲线 $f_m(x)$ 和 EV 持续充电时间 $f_L(x)$,依据其概率密度函数进行有序充电模拟分析。

有序充电模拟策略为:针对每个数据 $f_m(i)$ 的值进行判断。首先,判断该时刻是否属于峰时段或平时段,若处于峰或者平时段,则计算用户成本 S_r 是否满足响应电价 S_t 的调控,即 S_r 是否小于 S_t。其次,判断该点充电持续时间 $f_L(i)$ 可否全部转移到想要转移的时段,重新计算用户的响应值 S_t,并与考虑便利性的响应标准 S_n 进行比较。若 $S_t<S_n$,即用户响应值比响应标准低,则该用户不会改变充电时间,其 $f_m(i)$ 保持不变;若 $S_t>S_n$,即用户响应值大于响应标准值,则 $f_m(i)$ 由标准值 $f_n(i)$ 取代。

假设峰时段为 16:00—22:00;谷时段为 3:00—12:00;平时段为 00:00—03:00,12:00 —16:00,22:00—24:00;最优的峰谷电价比为 2.1。模拟结果如图 1 红色曲线所示。可以发现,有序充电实施后,充电负荷变得平滑,尤其在 17:00—21:00 达成了对电网一定范围的削峰填谷,并满足了 EV 充电需求。同时,从无序、有序充电规律可知,两者的负荷曲线大体趋势未变,有序充电可实现电网峰值较小额度的转移。为此,要满足 EV 用户充电需求,EV 充电站建设始终是重点[18—19],对其进行合理规划建设非常必要。

2 EV 充电站选址定容优化规划方法

EV 充电站优化规划的最佳目标是最大覆盖范围内满足 EV 用户的充电便利性且充电负荷尽可能满足配电网所接纳的容量。为此,提出两层优化规划模型。在第一层规划中,保证所有充电站的服务范围叠加起来完全覆盖整个区域内的充电需求点,确保充电的交通便利性,但对于充电需求点而言,有可能同时被多个充电站所覆盖,故而用户可以从中选择最优(最近)的充电站充电,即实现区域范围内 EV 充电站的选址;在第二层规划中,将重复的充电需求点再分配,并计算每个服务区域内的充电负荷需求,保证充电站的容量可以满足负荷需求,同时不超出配电网的接纳能力,即在第一层基础上对选址再次进行优化,确定每一个充电站的充电桩个数,实现 EV 充电站的定容。

2.1 EV 充电站规划方法

2.1.1 EV 充电站选址

在进行充电站选址时,主要考虑路网交通流量和便利性。其中,路网信息主要包括路网结构、节点汽车数量和道路车流量,路网结构越复杂,两点实际距离超过空间距离,充电站的实际服务半径将降低,用户驾车多行驶一段路才能到达充电服务点;节点汽车数量和道路车流量大时,用户可能遭遇堵车、红灯以及无空充电桩的情况,等待时间会延长。

(1) 目标函数。用户在出行过程中的损耗主要包括前往充电站路程的电量损耗和花费在路程上的等待时间损耗等。因此,以用户损耗最低,即便利性最优为目标函数。

$$\min C_L = \sum_{j=1}^{N_c} d_{i,j} q_j \left(\frac{p}{g} + \frac{k}{v} \right) \tag{2}$$

式中:$d_{i,j}$ 为充电需求点 i(路网节点)到充电站 j 的空间距离;N_c 为区域内所有充电站总数;q_j 为到达充

电站 j 的 EV 数量；p 为充电电价；g 为汽车行驶每公里消耗的电量；p/g 为每公里的电价成本；k 为用户出行时间价值；v 为 EV 行驶速度；k/v 得到每次出行的价值成本。

（2）约束条件。充电站的实际服务半径可能受路网结构的影响，路网的连通性越大，顾客到达充电站所需要的行驶距离越长；路网的车流量大，顾客到达充电站的路程等待时间越长。因此，在考虑道路交通情况、路网结构以及用户平均等待时间等影响因素后，充电站的服务半径为：

$$R = \frac{vt}{\lambda} \tag{3}$$

式中：λ 为道路的曲度系数，即两点的实际距离和空间距离的比值，文中选择连通性较好的、传统的棋盘式路网作为标准，λ 取 1.4；t 为 EV 以速度 v 实际运行的时间。

如果需求对象可以得到某个设施点的服务，则称该需求对象被覆盖，此类问题被称为覆盖问题。充电站选址符合最大覆盖模型问题，即在诸多限定条件下，保证每个充电需求点都能被充电站服务。假设充电站 j 的服务半径为 R_j，当满足 $d_{i,j} \leqslant R_j$ 时，充电站的服务范围可满足充电需求。

对于区域内的整体规划来说，区域内充电站数量越多，用户充电越方便，但多充电站的充电服务区域会发生大量重叠（重复覆盖问题），造成资源浪费。因此，在充电站规划中应尽量保证充电站服务区域不发生重叠，即当 $d_{i,j} \leqslant R_j$ 时，R_j 内的总服务流量满足：

$$H_j = \sum_i \omega d_i q_i \tag{4}$$

式中：ω 为重叠权数，其值与覆盖该充电需求点的充电站数相关，重叠权数值越小，则受重叠服务影响越小；d_i 为 R_j 内充电需求点 i 到多个充电站中心的空间距离；q_i 为 R_j 内路网节点 i 的 EV 流量。

2.1.2　EV 充电站定容

在充电站定容方面，主要考虑配电网的约束和用户的负荷需求。其中，配电网的约束主要体现在某个时刻充电站负荷需求不能超过配电网的最大接纳能力，充电站的最大负荷需求是指在高峰时刻满足服务区内的用户充电需求。但是，配电网由多个电网节点组成，每个电网节点的原始负荷和接纳能力都不一样，因此同样容量的充电站选择不同的电气接入点，会对配电网造成不同的网络损耗，而且有可能超出配电网的接纳能力。

（1）目标函数。充电站 j 的充电容量 S_j 应满足其服务范围内所有充电需求点 i 的充电需求 Q_j，即 $S_j \geqslant Q_j$。当 $d_{i,j} \leqslant R_j$ 时，Q_j 满足：

$$Q_j = \sum_i q_i P_{ev} k_{need} \tag{5}$$

式中：P_{ev} 为 EV 的平均充电需求；k_{need} 为需要充电的 EV 比例。

（2）约束条件。每个新建的充电站都有对应的电气接入点，充电站处的负荷接入不超过配电网的接纳能力，假设电网节点的最大接纳负荷为 $S_{k,\max}$（k 为电网节点的数量），高峰时段充电负荷由图 1 日充电负荷曲线得出。则：

$$Q_j \leqslant S_{k,\max} \tag{6}$$

此外，充电站的规划还要满足变压器容量约束和配电网最大功率约束。变压器容量约束为：

$$\sum_{j=1}^{m} Q_j \leqslant S_{T,\max} \tag{7}$$

式中：$S_{T,\max}$ 为与变压器相连的配电网最大接纳负荷；m 为充电站总数。

配电网最大功率约束为：

$$\sum_{j=1}^{m} P_j \leqslant P_{c,\max} \tag{8}$$

式中：P_j 为充电站 j 的负荷；$P_{c,\max}$ 为整个配电网可以接入的最大充电负荷。

将电网节点按接纳能力分为多个等级，当电网节点接入负荷后，该电网节点到变电站之间的负荷分布都会发生改变。因不同的网络拓扑，负荷变化情况不一样，节点距离差 K_j 越大，网络损耗将越大。K_j 满足：

$$K_j = \sum_{j=1}^{m} Z_j \frac{L_q}{L_c} \tag{9}$$

式中：Z_j 为高峰时段的充电站负荷接入；L_q 为充电站到电气接入点的距离；L_c 为充电站到配电网变电站的距离。

同时，对于整个区域内的充电站数量存在一个限定区间，可用规划区域内的总充电负荷 Q 来衡量。充电站的自身容量存在限制，即 $S_{\min} \leqslant S_j \leqslant S_{\max}$，故规划区域内的充电站数量 N 为：

$$\begin{cases} N \in [N_{\min}, N_{\max}] \\ N_{\min} = \dfrac{Q}{S_{\max}} + 1 \\ N_{\max} = \dfrac{Q}{S_{\min}} \end{cases} \tag{10}$$

充电站内的主要基础设施为充电桩，充电桩的台数需要满足该充电站在其服务范围内的日最大充电需求，因此充电站的充电桩配置数 m_j 满足：

$$m_j = \left[\frac{Q_j(\rho + 1)}{P_{ce} k_x T_v k_t} \right] + 1 \tag{11}$$

式中:ρ 为充电站的充电裕度;P_{ce} 为充电桩的额定充电功率;k_x 为充电效率;T_v 为充电站平均每日有效充电时间;k_t 为充电站内充电桩同时充电的概率。

2.2 选址定容优化规划流程

为对 EV 充电站两层优化规划模型进行求解,提出采用粒子群和 Voronoi 算法相结合进行求解,具体算法流程如图 2 所示,主要步骤如下:

(1) 确定粒子群的数量 N,由 2.1 节可知,N 存在上下限,从 N_{min} 开始,将粒子群置入规划区域内,适应度函数参考式(2),并由此确定粒子的速度更新公式。

(2) 通过式(3)的最优服务半径寻找充电站服务范围内的充电需求点,保证区域内的每个充电需求点都在各自充电站之内,即所有充电站的服务范围覆盖所用充电点;若不满足则更新粒子群的速度和位置,此时的目标规划为服务区全部覆盖,适应度函数与此相关。

(3) 以当前的粒子位置在规划区域内绘制 Voronoi 图,计算每个充电站的容量(即粒子的属性),再计算该充电站能否满足其所处区域内的充电需求,同时判断各充电站的容量能否接入配电网的节点;若不满足,则更新粒子群的速度和位置,此时的目标规划为各充电站容量满足需求,适应度函数与此相关;若满足上述条件,则将粒子群的位置保存下来,并计算路损和网损。

(4) 将每次第 3 步得到的路损做比较,选取最小值作为最优结果,保存粒子的位置,此时的适应度函数为路损最低,故而粒子群的更新情况受路损最低的目标影响,并进入下一次迭代。将 N 作为粒子群迭代的最大次数,也是粒子群算法的终止条件。当仿真终止后,增加粒子群的数量 N,规划流程与上述步骤(1)—(3)一致,直至得到 N_{max} 的结果。

(5) 将充电站的数量从最小值到最大值进行最优规划方案对比分析,主要包括路损(用户在前往充电站路途中所消耗的电量)、网损(不同电气接入点对配电网的损耗)、覆盖率(重复覆盖率可能造成资源浪费)等 3 个方面,实现选择最佳充电站的规划方案。

3 算例分析

3.1 模型合理性验证

为了说明所提优化模型的有效性,选用北方城市一个区域的实际运行案例进行验证。

根据某市的区域规划情况,EV 充电站所处区域采用棋盘式的路网结构,分成 4×10 个区域。其中,EV 总量约为 1.5 万辆,路网节点 40 个,路段为 94 段,规划区面积为 55 km^2,EV 的平均行驶速度为 25 km/h,路网节点 EV 的充电率为 10%,用户的出行时间价值为 10 元/h,EV 平均容量为 50 kW,道路曲度系数取 1.4,用户等待时间为 5~10 min,EV 行驶消耗的电量为 7 kW·h/km,充电电价为 0.8 元/(kW·h),区域路网结构如图 3 所示。区域内电源为 3 座 35 kV/10 kV 的变电站,每一个变电站的容量为 2×32 MV·A,负荷节点为 24 个,配电网网络结构见图 4。电网节点位置及负荷如附表 A1 所示,路网节点的位置及日车流量如附表 A2 所示。

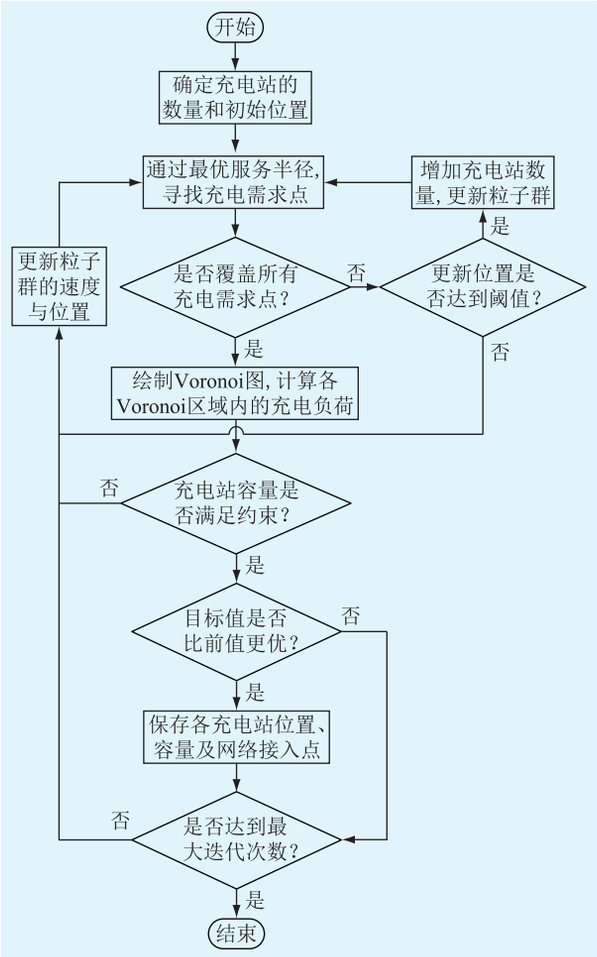

图 2 EV 两层优化规划

Fig.2 Two-layer optimization planning of EV

设定粒子群算法中的更新速度:自我学习因子 c_1 初始值为 0.5;社会学习因子 c_2 初始值为 0.5;惯性权重 ω 初始值为 0.9。为了增大其全局搜索能力,学习因子和惯性权重值随着迭代次数而改变,搜索能力由全局逐渐转变为局部,由个体转变为群体最优。搜索空间初始值 x,y 的取值范围分别为 0~10.5, 0~4.5。更新最大速度与搜索空间边界相

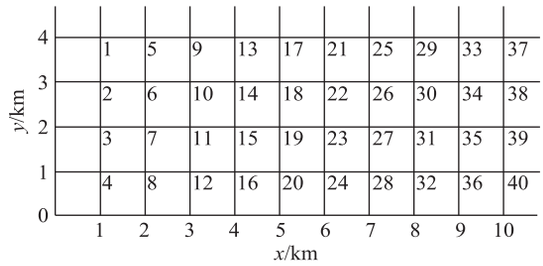

图 3　区域路网结构

Fig.3　Regional road network structure

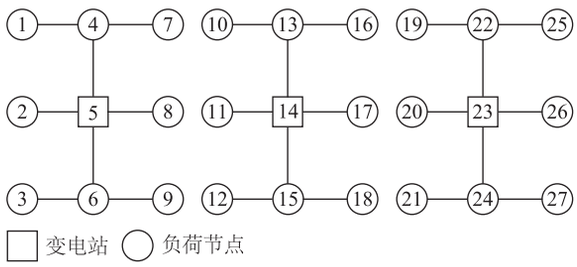

图 4　区域配电网网络结构

Fig.4　Regional distribution network structure

关,取比例 k 为 0.5。基于本区域的负荷分布,得到充电站的容量限制 S_{min} 为 5 MW,S_{max} 为 12 MW,由式(10)可得规划区内充电站为 7~16 座。因此,按照规划流程,从 7 座充电站开始进行仿真运算,比较不同充电站座数下最优选址以及用户的损耗成本、配电网络损耗、重复覆盖率等。

由于用户等待时间为 5~10 min,按照中点定律取 7.5 min 为用户平均等待时间,依次计算充电站的服务半径。仿真运算表明,当将充电站为 12 座时,重复覆盖率为81%;充电站为 13 座时,重复覆盖率将达到 90%以上,说明各充电站的充电服务区域有 90%的区域是重叠的,不满足实用性的要求,后续仿真分析不考虑充电站为 13 座的情况。将用户的损耗成本设置为适应度函数,在符合当前路网结构和交通流量的基础上,适应度越高,即用户的出行损耗成本越低,越满足用户便利性的要求。

图 5 为不同数量 EV 充电站对应的路程损耗、充电服务区域重复覆盖率。在区域范围内安装充电站为 7~12 座时,用户的出行损耗成本依次为 860.996 万元,691.519 万元,640.509 万元,626.062 万元,612.085 万元,577.647 万元。充电站由 7 座增加到 12 座时,重复覆盖率依次为 22.5%,42.3%,42.0%,45.3%,69.8%,81.0%。可见,随着充电站数量的增多,用户的出行损耗成本降低,符合用户便利性的要求;充电站的数量在 8,9,10 座时,重复覆盖率变化最低;充电站数量由 8 到 9 座跨越时,成本损耗降率最高。故相对于建造 8 座充电站而言,多建造 1 座充电站,可以提升用户的便利性,满足用户的需求,且受充电服务区域重叠的影响较小。

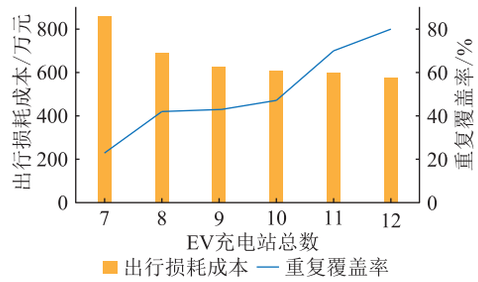

图 5　不同规划方案的出行损耗成本和充电服务区域重复覆盖率

Fig.5　Road loss cost and charging range repetitive coverage rate of different planning options

为分析充电站数量对配电网负荷的影响,图 6 给出了 7~12 座充电站的网络损耗依次为 1 330.69 万元,2 888.94 万元,1 845.08 万元,2 345.08 万元,2 181.93万元,5 010.59 万元。由图 6 可知,对于规划面积为 55 km^2的区域,充电站达到 12 座时,网损值变化很大,主要原因是电气接入点过多,在充电行为波动的情况下,会破坏原有配电网的稳定性。

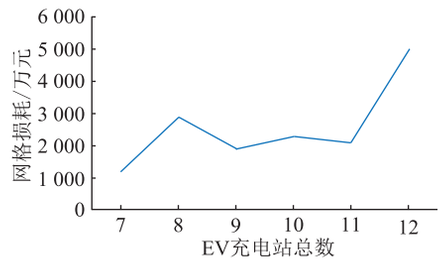

图 6　不同规划方案的网络损耗

Fig.6　Network loss of different planning options

根据规划目标和方案选取条件,优先考虑便利性,其次考虑实用性和网络损耗,则建造 10 座充电站优于 9 座充电站。10 座充电站的规划布局如图 7 所示。

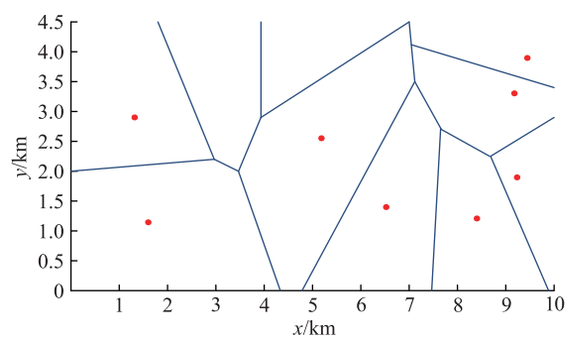

图 7　10 座充电站选址

Fig.7　Site selection of 10 EV charging stations

计算图 7 中各充电站所处区域范围内的充电需求,以式(11)计算各充电站内至少配备的充电桩台

数。取充电站的充电裕度为 20%,充电站内充电桩同时充电的概率为 90%,充电效率为 90%,充电站平均日有效充电时间为 16 h,结果如表 1 所示。

表 1 基于用户便利性及实用性的充电站规划方案

Table 1 Charging station planning scheme based on user convenience and practicality

充电站序号	充电站位置/km	充电需求/kW	充电桩台数	覆盖路网节点序号
1	(9.49,3.79)	6 750	7	29,33,37
2	(8.50,1.19)	6 455	7	31,32,36
3	(4.43,3.83)	5 075	5	13,14,17
4	(9.68,1.80)	8 300	9	35,39,40
5	(9.38,3.33)	5 680	6	30,34,38
6	(6.69,1.39)	8 095	8	23,24,26,27,28
7	(5.10,2.61)	10 430	11	15,16,18,19,20,21,22,25
8	(1.41,2.97)	6 530	7	1,2,5,6
9	(3.36,3.82)	7 540	8	9,10
10	(1.50,1.14)	7 300	8	3,4,7,8,11,12

各充电站的位置及在配电网中的电气接入点,如图 8 所示。

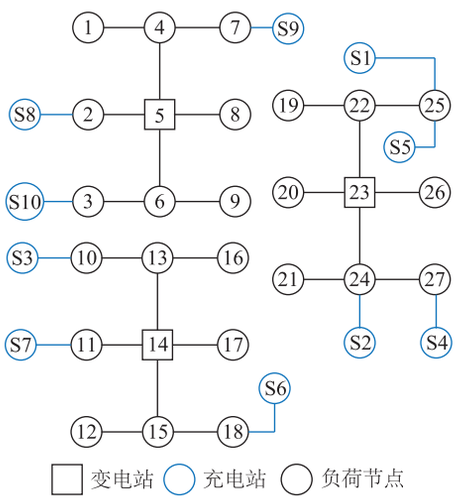

图 8 充电站电气接入位置

Fig.8 Electrical access location map of EV charging station

由图 5—图 8、表 1 分析可知:

(1) 充电站和充电站内充电桩的数量,是区域范围内 EV 充电站规划的典型覆盖问题,也是 EV 规划的难点。由表 1 分析可知,9 号充电站仅承担 2 个路网节点的负荷,需要布置 8 台充电桩;3 号充电站承担了 3 个路网节点的负荷,但仅用 5 台充电桩就可以满足需求。

(2) 区域范围内 EV 选址定容,分为两步走策略,即以用户充电便利性为优先条件确定选址,以配电网接纳容量为原则确定充电站中充电桩的个数,较好解决了充电站规划过程中交通、用户、电网等多不确定性约束条件下的优化规划难题。

3.2 方法对比分析

为验证求解模型方法的优越性,以 3.1 节的原始数据为基础,在同一台计算机上(CPU i5 双核,8G 内存),将粒子群和 Voronoi 混合方法与蚁群算法、遗传算法进行对比分析,计算结果如表 2 所示。

表 2 算法结果对比

Table 2 Algorithm results comparation

项目	计算时间/s	迭代次数/次	收敛精度
粒子群和 Voronoi 混合方法	1.23	6	1×10^{-6}
蚁群算法	7.86	21	1×10^{-6}
粒子群算法	8.22	25	1×10^{-6}

从表 2 可知,粒子群和 Voronoi 混合方法与蚁群算法、遗传算法相比,相同的电脑配置和收敛精度条件下,计算时间和迭代次数均最少。

4 结论

(1) 针对 EV 充电站规划过程中充电站的选址和充电站内充电桩数量优化难的问题,提出计及交通便利性和配电网接纳能力的 EV 充电站选址定容优化规划方法,满足 EV 用户随机充电需求,可为后续规划建设提供借鉴。

(2) 针对 EV 模型非线性约束多且求解难的问题,应用粒子群和 Voronoi 相结合的方法进行求解,相对于蚁群算法、遗传算法等启发式算法,在速度、迭代次数方面更优。

(3) 通过实际 EV 充电站规划工程案例分析,验证了文中方法和模型的合理性,在用户便捷性和配电网接纳容量两者相斥约束下,若模型最佳解在若干个方案之间,可采用枚举法求解最佳选址定容问题。

本文得到国网江苏省电力有限公司科技项目(J2019121)资助,谨此致谢!

参考文献:

[1] 李盛伟,孙巧,白星振,等. 面向用户需求的电动汽车充电站最优规划模型研究[J]. 可再生能源,2018,36(4):568-573.
LI Shengwei,SUN Qiao,BAI Xingzhen,et al. Optimal planning model for electric vehicle charging stations considering user's demands[J]. Renewable Energy Resource,2018,36(4):568-573.

[2] 李磊,李晓辉,刘伟东,等. 规模化电动汽车充电特性对小区级配电网可靠性的影响分析[J]. 河南理工大学学报(自然科学版),2019,38(5):105-111.
LI Lei,LI Xiaohui,LIU Weidong,et al. An impact analysis of

large-scale vehicle charging on reliability of small-regional distribution network[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science),2019,38(5):105-111.

[3] 王毅,王飞宏,侯兴哲,等. 住宅区电动汽车充电负荷随机接入控制策略[J]. 电力系统自动化,2018,42(20):53-58.
WANG Yi, WANG Feihong, HOU Xingzhe, et al. Random access control strategy of charging for household electric vehicle in residential area[J]. Automation of Electrical Power Systems, 2018,42(20):53-58.

[4] 苏粟,杨恬恬,李玉璟,等. 考虑实时动态能耗的电动汽车充电路径规划[J]. 电力系统自动化,2019,43(7):136-143.
SU Su, YANG Tiantian, LI Yujing, et al. Charging route planning for electric vehicles considering real-time dynamic energy consumption[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(7):136-143.

[5] 麻秀范,王皓,李颖,等. 基于变权 Voronoi 图和混合粒子群算法的电动汽车充电站规划[J]. 电工技术学报,2017,32(19):160-169.
MA Xiufan, WANG Hao, LI Ying, et al. Optimal planning of charging stations for electric vehicle based on weight-charged Voronoi diagram and hybrid particle swarm optimization algorithm[J]. Transactions of China Eletrotechnical Society, 2017,32(19):160-169.

[6] 李渊博,蒋铁铮,陈家俊,等. 城市电动汽车充电站的多目标规划[J]. 电力系统及其自动化学报,2017,7(7):112-117.
LI Yuanbo, JIANG Tiezheng, CHEN Jiajun, et al. Multi-objective programming of charging stations for urban electric vehicles [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017,7(7):112-117.

[7] 丁明,史盛亮,潘浩,等. 含电动汽车充电负荷的交直流混合微电网规划[J]. 电力系统自动化,2018,42(1):32-38, 81.
DING Ming, SHI Shengliang, PAN Hao, et al. Planning of AC/DC hybrid microgrid with integration of electric vehicle charging load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018,42(1): 32-38,81.

[8] 葛少云,朱林伟,刘洪,等. 基于动态交通仿真的高速公路电动汽车充电站规划[J]. 电工技术学报,2018,33(13): 2991-3001.
GE Shaoyun, ZHU Linwei, LIU Hong, et al. Optimal deployment of electric vehicle charging stations on the highway based on dynamic traffic simulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018,33(13):2991-3001.

[9] 张书玮,冯桂璇,樊月珍,等. 基于信息交互的大规模电动汽车充电路径规划[J]. 清华大学学报(自然科学版),2018,58(3):279-285.
ZHANG Shuwei, FENG Guixuan, FAN Yuezhen, et al. Large-scale electric vehicle charging path planning based on information interaction[J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2018,58(3):279-285.

[10] 闫天泽,邱晓燕,刘延博,等. 基于引入模拟退火思想的改进粒子群算法的电动汽车充电站最优规划[J]. 电测与仪表,2017,54(6):11-16.
YAN Tianze, QIU Xiaoyan, LIU Yanbo, et al. Optimal planning of electric vehicle charging station based on PSOSA algorithm [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017,54(6): 11-16.

[11] 张涛,章佳莹,王凌云,等. 计及用户行为的电-气-热综合能源系统日前经济调度[J]. 电力系统自动化,2019,43(11): 86-94.
ZHANG Tao, ZHANG Jiaying, WANG Lingyun, et al. Day-ahead economical dispatch of electricity-gas-heat integrated energy system considering user behaviors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019,43(11):86-94.

[12] 刘洪,张旭,刘畅,等. 考虑充电设施充裕性的电动私家车出行与充电需求时序交互分析[J]. 中国电机工程学报, 2018,38(18):5469-5478.
LIU Hong, ZHANG Xu, LIU Chang, et al. Timing interactive analysis of electric private vehicle traveling and charging demand considering the sufficiency of charging facilities[J]. Proceedings of the CSEE, 2018,38(18):5469-5478.

[13] 刘畅,刘洪,李香龙,等. 考虑路网与配电网可靠性的电动汽车充电站多目标规划[J]. 电力自动化设备,2017,37(8):28-34.
LIU Chang, LIU Hong, LI Xianglong, et al. Multi-objective EV charging station planning with consideration of road network reliability and distribution network reliability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017,37(8):28-34.

[14] MEYER D, KORBER M, SENNER V, et al. Regulating the heart rate of human-electric hybrid vehicle riders under energy consumption constraints using an optimal control approach[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2019, 27(5):2125-2139.

[15] FERNANDEZ R A, CARABALLO S C, LOPEZ F C. A probabilistic approach for determining the influence of urban traffic management policies on energy consumption and greenhouse gas emissions from a battery electric vehicle[J]. Journal of Cleaner Porduction, 2019,236:1-14.

[16] MOKGONYANA L, SMITH K, GALLOWAY S. Reconfigurable low voltage direct current charging networks for plug-in electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019,10(5): 5458-5459.

[17] 王汉华,陈永进. 电动汽车充电设施接入配电网的最优布点规划[J]. 广东电力,2018,31(4):72-78.
WANG Hanhua, CHEN Yongjin. Optimal stationing planning for electric vehicle charging facilities accessing to distribution network[J]. Guangdong Electric Power, 2018,31(4):72-78.

[18] 王建明,潘志新,李春,等. 配电网电动汽车接纳能力分析[J]. 供用电,2019,36(5):42-47.
WANG Jianming, PAN Zhixin, LI Chun, et al. Distribution network electric vehicle hosting capability assessment[J]. Distribution & Utilization, 2019,36(5):42-47.

[19] 李逸欣,林勇,杨军. 基于改进加权 Voronoi 图的多场景电动汽车充电网络规划方法[J]. 广东电力,2019,32(8): 43-50.
LI Yixin, LIN Yong, YANG Jun. Research on multi-scenario

planning method for EV charging network based on improved weighted Voronoi diagram[J]. Guangdong Electric Power, 2019,32(8):43-50.

作者简介:

徐荆州

徐荆州(1981),男,博士,高级工程师,从事电力系统规划设计相关工作(E-mail:tecnaxu@163.com);

葛磊蛟(1984),男,博士,讲师,研究方向为智能配用电、云计算和大数据;

杨昌海(1982),男,硕士,高级工程师,从事电力系统规划设计相关工作。

附 录 A

表 A1 电网节点位置及负荷

Table A1 Grid location and load

电网节点序号	横坐标/km	纵坐标/km	负荷/kW
1	1.5	1.5	1 301.705
2	1.5	2.5	1 225.29
3	1.5	3.5	1 548.96
4	2.5	1.5	901.05
5	2.5	2.5	0
6	2.5	3.5	745.18
7	3.5	1.5	815.90
8	3.5	2.5	1 524.20
9	3.5	3.5	702.05
10	4.5	1.5	1 247.69
11	4.5	2.5	1 580.96
12	4.5	3.5	1 512.33
13	5.5	1.5	1 598.24
14	5.5	2.5	0
15	5.5	3.5	948.96
16	6.5	1.5	861.18
17	6.5	2.5	732.30
18	6.5	3.5	1 478.57
19	7.5	1.5	807.51
20	7.5	2.5	1 426.62
21	7.5	3.5	1 476.62
22	8.5	1.5	706.59
23	8.5	2.5	0
24	8.5	3.5	981.80
25	9.5	1.5	1 312.70
26	9.5	2.5	932.65
27	9.5	3.5	1 023.50

表 A2 规划区域内路网节点位置及日车流量

Table A2 Location of each node and traffic flow and in the planned area

路网节点序号	横坐标/km	纵坐标/km	日车流量/辆
1	1	4	181
2	1	3	137
3	1	2	182
4	1	1	346
5	2	4	249
6	2	3	739
7	2	2	344
8	2	1	148
9	3	4	724
10	3	3	784
11	3	2	351
12	3	1	89
13	4	4	206
14	4	3	327
15	4	2	476
16	4	1	210
17	5	4	482
18	5	3	569
19	5	2	177
20	5	1	94
21	6	4	237
22	6	3	255
23	6	2	339
24	6	1	406
25	7	4	68
26	7	3	210
27	7	2	641
28	7	1	23
29	8	4	743
30	8	3	584
31	8	2	391
32	8	1	463
33	9	4	190
34	9	3	367
35	9	2	770
36	9	1	437
37	10	4	417
38	10	3	185
39	10	2	391
40	10	1	499

(下转第 142 页)