

含不同容量充电桩的电动汽车充电站选址定容优化方法

肖 白,高 峰

(东北电力大学 电气工程学院,吉林 吉林 132012)

摘要:针对电动汽车充电站(EVCS)的最佳数量、站址以及容量难以确定的问题,提出了一种在备选站址既定的情况下含不同容量充电桩的EVCS选址定容优化方法。首先,根据电动汽车(EV)的行为特征和待规划充电桩的容量,计算EV产生充电需求时选用不同容量充电桩进行充电的概率,并结合目标年城市预计的车流量采用蒙特卡罗方法对EV充电需求的时空分布、不同容量充电桩的平均充电速率和EV用户选用不同容量充电桩时的平均停车持续时间进行预测;然后,建立EVCS选址定容的双层规划模型,上层模型以EVCS的年化总成本与EV用户的年损失成本之和最小为目标对EVCS进行选址优化,下层模型以EV用户到站的行驶距离最短为目标对每座EVCS的服务范围进行划分,并将各EVCS服务范围内的充电负荷返回给上层模型,结合预测结果进行定容优化;最后,结合模拟退火算法和迪克斯特拉算法对双层规划模型进行求解。算例分析结果验证了所提方法的正确性和有效性。

关键词:电动汽车;充电站;选址定容;充电需求预测;双层规划;模拟退火算法;迪克斯特拉算法

中图分类号:U 469.72;TM 715

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202207001

0 引言

面对全球化石能源日渐枯竭、能源利用效率低和环境污染问题凸显的三大挑战^[1],我国制定了碳达峰和碳中和的“双碳”战略目标。交通是仅次于电力和工业的碳排放大头,因此,大力发展和普及电动汽车EV(Electric Vehicle)成为应对上述三大挑战和实现“双碳”战略目标的重要措施之一^[2]。电动汽车充电站EVCS(Electric Vehicle Charging Station)作为普及EV的必备基础设施,对其进行合理的规划和建设具有迫切的需求和重要的现实意义^[3]。

目前,国内外针对EVCS的规划进行了大量的研究,主要包括充电需求预测、选址定容模型建立和模型求解3个方面。在充电需求预测方面:文献[4]采用蒙特卡罗方法对共享EV的充电负荷进行预测;文献[5]以EV用户出行数据和用户充电行为特征为依据,对目标区域内EV的充电需求进行预测;文献[6]基于数据驱动的方式,通过及时捕获用户的位置和电量信息对EV的充电需求进行预测。但是,上述EV充电需求预测方法都是对目标区域内EV总充电需求的时空分布进行预测,没有考虑对含有多种容量充电桩的充电站进行规划时EV用户对各种容量充电桩的选择行为。

在选址定容模型建立方面:文献[7]以充电站的投资运营年均成本最小为目标,建立了充电站选址定容的数学模型;文献[8]同时兼顾充电站和用户双方的利益,建立了基于数据驱动的分布式鲁棒优化定容模型;文献[9]同时考虑电力系统与交通系统的深度交互以及不同充电站内EV用户的转移问题,提出了一种考虑网络转移特性的城市内快速充电站的规划方法;文献[10]综合考虑充电站的建设运行成本、电动出租车的到站时间成本及充电等待时间成本,建立了充电站的规划模型。但是,在上述充电站的选址定容模型中,假设充电站内充电桩的容量都相同,且在充电站的定容阶段假设EV用户的充电时长和停车持续时间相等,忽略了在现实生活中不同EV用户产生充电需求时的时空状态、所处的生活状态、EV电池寿命等因素都会对充电桩的容量、充电时长和停车时长产生不同的预期。

在模型求解方面,文献[11]将粒子群优化算法与最短路径规划优化的迪克斯特拉(Dijkstra)算法相组合,对EV充换放储一体化电站的双层规划模型进行求解,取得了较好的效果。模拟退火SA(Simulated Annealing)算法能有效收敛于全局最优^[12],因此本文结合SA算法和Dijkstra算法对双层模型进行联合求解。

鉴于上述问题,本文提出了一种含不同容量充电桩的EVCS选址定容优化方法,并基于北方某城市经济开发区的工程实例验证本文所提方法的正确性和有效性。

1 基本原理

含不同容量充电桩的EVCS选址定容优化方法

收稿日期:2022-03-18;修回日期:2022-05-28

在线出版日期:2022-07-11

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB0902205);吉林省产业创新专项基金资助项目(2019C058-7)

Project supported by the National Key R&D Program of China (2017YFB0902205) and the Industrial Innovation Foundation of Jilin Province(2019C058-7)

的基本原理示意图如图1所示。

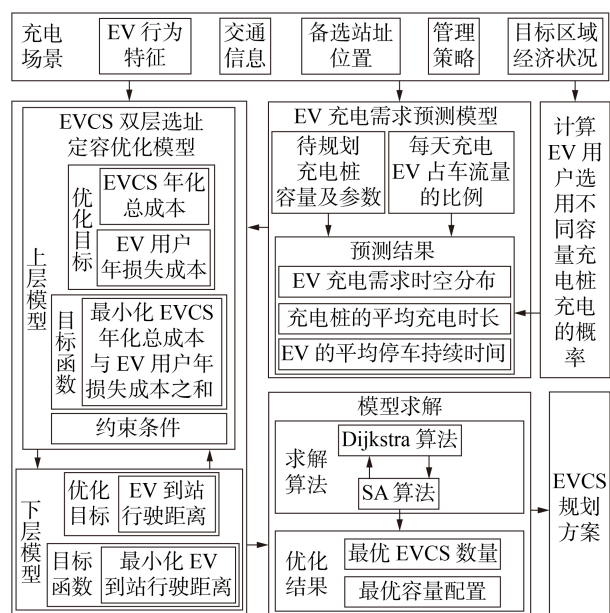


图1 基本原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of basic principle

1)管理策略。当前,EV普遍采用恒流-恒压CC-CV(Constant Current-Constant Voltage)方式进行充电。这种充电方式分为2个阶段:当EV起始充电时刻电池的荷电状态SOC(State Of Charge)较低时,采用恒定大电流进行快速充电(即恒流充电);当EV电池的SOC达到恒流充电阶段的最大值,即充电阈值时,采用恒压充电模式继续充电(即恒压充电),这样能在保证充电速率的同时延长电池的使用寿命。但是,在EV充满电的过程中,恒压充电阶段的充电时长与恒流充电阶段的充电时长相近,而恒压充电阶段的充电量却远小于恒流充电阶段的充电量^[13]。因此,本文设定EVCS投资运营者在经营充电站时的管理策略为:在充电高峰时段牺牲一部分EV用户的利益,即只采取恒流充电模式将EV电池的SOC充至其充电阈值,若在充电高峰时段结束后用户仍未返回充电站,则以恒压充电模式继续对EV进行充电。

2)充电场景分析。EVCS的规划是涉及企业、市政、交通、电力等多个部门的协调规划^[14]。本文在市政部门已给出备选站址和目标区域经济状况的基础上,在车流信息、充电站的管理策略和EV行为特征(本文中的EV行为特征具体包括EV起始充电时刻的剩余电量、充电过程中的停车持续时间、充电时电池电量的阈值)已知的条件下,对最优EVCS数量、站址位置、EVCS内的车位数量以及站内不同容量充电桩的数量进行规划。为了便于叙述,本文仅对站内含有2种不同容量的直流充电桩(容量分别为A和B)的情况进行讨论,其中容量为B的充电桩的额定功率是容量为A的充电桩的额定功率的2.5倍。需

要说明的是,本文所提优化方法同样适用于EVCS内含有多种容量充电桩的场景。

3)EV充电需求预测模型建立。首先,通过分析充电场景,计算EV用户有充电需求时选用不同容量充电桩充电的概率;然后,结合目标年每天到达EVCS进行充电的EV占车流量的比例和待规划充电桩的容量及参数,采用蒙特卡罗方法对EV充电需求的时空分布、EV用户选用不同容量充电桩进行充电的平均充电时长以及停车持续时间进行预测。

4)EVCS双层选址定容模型建立。EVCS作为公共基础设施,其规划不仅涉及投资经营者的利益,还涉及EV用户等多方利益,所以在规划时都要考虑。鉴于此,本文同时考虑了EVCS内有多种容量充电桩、EV用户的停车时长、EV选用不同容量充电桩时的充电时长等因素,结合本文设定的管理策略,建立了以充电站的年化总成本与EV用户年损失成本之和最小为目标,以EVCS之间的距离、EVCS的数量、EVCS的容量和单桩充电功率为约束条件的上层EVCS选址定容优化模型,以及以EV用户到站充电过程中行驶距离最短为目标的下层EVCS服务范围优化模型。

5)模型求解。本文采用SA算法和Dijkstra算法对双层规划模型进行联合求解,根据适应度值得到目标区域的最优EVCS数量以及各EVCS的位置和最优容量配置。

2 EV用户选用不同容量充电桩充电的概率计算

目前,我国主要的EV类型包括电动私家车、电动出租车、电动商务车和电动公交车。其中,电动出租车的电池型号一致,其电能补给方式采用换电模式时优势较大;电动公交车由政府交管部门统一运营。故本文所研究的充电站主要为面向电动私家车和电动商务车的公共型充电站。

在用户的日常出行过程中,EV在不同目标区域的停车持续时间会呈现不同的规律和变化趋势,且产生充电需求时的选择行为与充电需求大小、可选用的充电桩容量、用户在出行活动中计划的停车持续时间^[15]、EV电池寿命、不同容量充电桩的充电价格等因素有关。其中:停车持续时间较长的用户倾向于选用小容量的充电桩以降低充电成本;停车持续时间较短的用户宁可增加其充电成本也会选用大容量的充电桩。因此,本文根据EV的停车持续时间来判断用户更倾向于选用的充电桩容量。

可根据以下步骤计算EV在产生充电需求时分别选用容量为A和B的充电桩进行充电的概率。

1)计算EV在停车持续时间内采用容量为A的充电桩进行充电不能满足其充电需求时,采用容量

为 B 的充电桩进行充电的条件为:

$$\frac{P_A \eta T_p}{60C} + S_{\text{start}} \leq S_{\text{CC}} \quad (1)$$

式中: P_A 为容量为 A 的充电桩在恒流充电阶段的充电功率; η 为充电桩的充电效率; T_p 为 EV 的停车持续时间; S_{CC} 为 EV 的 SOC 充电阈值; S_{start} 为 EV 起始充电时刻的 SOC; C 为目标区域 EV 电池的平均容量。

2) 根据式(2)计算式(1)发生的概率 p_i , 即 EV 到站充电时选用容量为 B 的充电桩进行充电的概率。

$$p_i = p\left(\frac{P_A \eta T_p}{60C} + S_{\text{start}} \leq S_{\text{CC}}\right) \quad (2)$$

式中: $p(\cdot)$ 为括号内事件发生的概率。

假设 T_p 和 S_{start} 这 2 个变量相互独立, 根据 2 维随机变量的概率公式^[16], 可将式(2)转化为:

$$p_i = \iint \frac{P_A \eta T_p}{60C} + S_{\text{start}} \leq S_{\text{CC}} f_T(T_p) f_{\text{soc}}(S_{\text{start}}) dT_p dS_{\text{start}} \quad (3)$$

式中: $f_T(T_p)$ 为 EV 停车持续时间的概率密度函数; $f_{\text{soc}}(S_{\text{start}})$ 为 EV 起始充电时刻 SOC 的概率密度函数, 具体表达式见附录 A 式(A1)。

则 EV 到站充电时选用容量为 A 的充电桩进行充电的概率 p_s 可表示为:

$$p_s = 1 - p_i \quad (4)$$

3 基于用户出行特征的 EV 充电需求预测

合理准确地预测 EV 充电需求是对充电设施进行选址定容的基础。为了方便研究, 本文将各街道上 EV 产生的充电需求等效到距其最近的各路口节点上, 然后基于 EV 用户日常出行过程中的时间、空间和电量特征以及 EV 到站充电时选用不同容量充电桩进行充电的概率, 采用蒙特卡罗方法对 EV 充电需求进行预测, 具体步骤如下。

1) 计算目标区域内每天到 EVCS 进行充电的 EV 数量 n_{ev} 。

$$n_{\text{ev}} = \sum_{k=1}^{n_c} q_k \beta \quad (5)$$

$$n_{\text{ev}, B} = p_i n_{\text{ev}} \quad (6)$$

$$n_{\text{ev}, A} = p_s n_{\text{ev}} \quad (7)$$

式中: n_c 为目标区域内的路口节点数量; q_k 为考虑 EV 增长后, 在目标年路口节点 k 处预计每天产生的车流量; β 为在目标年考虑每天在家或公司等其他地方充电的 EV 后, 车流量中每天到 EVCS 进行充电的 EV 比例^[17]; $n_{\text{ev}, B}$ 、 $n_{\text{ev}, A}$ 分别为目标区域内每天到 EVCS 进行充电的 EV 中选用容量为 B 、 A 的充电桩进行充电的 EV 数量。

2) 分别根据式(8)—(10)随机抽取目标区域每天到 EVCS 充电的所有 EV 的停车持续时间、起始充电时刻的 SOC 及起始充电时刻, 并根据式(1)判断其

选用的充电桩容量。

$$T_{p,n} = \text{rand}(f_T(T_p)) \quad n=1, 2, \dots, n_{\text{ev}} \quad (8)$$

$$S_{\text{start}, n} = \text{rand}(f_{\text{soc}}(S_{\text{start}})) \quad n=1, 2, \dots, n_{\text{ev}} \quad (9)$$

$$t_{\text{start}, n} = \text{rand}(f_{\text{EV}}(t)) \quad n=1, 2, \dots, n_{\text{ev}} \quad (10)$$

式中: $T_{p,n}$ 为第 n 辆产生充电需求的 EV 在 EVCS 内的停车持续时间; $S_{\text{start}, n}$ 为第 n 辆 EV 起始充电时刻的 SOC; $t_{\text{start}, n}$ 为第 n 辆 EV 的起始充电时刻; $f_{\text{EV}}(t)$ 为目标区域内 EV 起始充电时刻满足的概率密度分布函数; $\text{rand}(\cdot)$ 表示取满足括号内概率密度函数的随机数。

3) 根据式(11)—(15)求取目标区域内 EV 产生的充电需求。

$$P_n = \begin{cases} (S_{\text{CC}} - S_{\text{start}, n})C & f=1 \\ (S_{\text{end}, n} - S_{\text{start}, n})C & f=0 \end{cases} \quad (11)$$

$$S_{\text{end}, n} = \begin{cases} S_{\text{CC}} & T_{p,n} \leq T_{\text{CC}, n} \\ S_{\text{CC}} + S_{\text{CV}, n} & T_{\text{CC}, n} < T_{p,n} < T_n \\ 1 & T_{p,n} \geq T_n \end{cases} \quad (12)$$

$$S_{\text{CV}, n} = \int_{T_{\text{CC}, n}}^{T_{p,n}} P_M(t) \eta dt \quad M \in \{A, B\} \quad (13)$$

$$T_{\text{CC}, n} = \frac{S_{\text{CC}} - S_{\text{start}, n}}{P_M \eta} \quad M \in \{A, B\} \quad (14)$$

$$P_M(t) = P_M e^{-\lambda(t - T_{\text{CC}, n})} \quad M \in \{A, B\} \quad (15)$$

式中: P_n 为第 n 辆 EV 产生的充电需求; f 为判断 EVCS 内充电高峰时段的变量, 当 EVCS 处于充电高峰时段时 $f=1$, 当 EVCS 不处于充电高峰时段时 $f=0$; $S_{\text{end}, n}$ 为第 n 辆 EV 充电结束时刻的 SOC; $S_{\text{CV}, n}$ 为第 n 辆 EV 在停车持续时间内采用恒压充电模式充电的 SOC 大小; $T_{\text{CC}, n}$ 为第 n 辆 EV 采用恒流充电模式充电的时长; T_n 为第 n 辆 EV 充电至 SOC 为 100% 所需的时长, 具体计算方法可参考文献[18]; $M \in \{A, B\}$ 为充电桩容量变量, 当第 n 辆 EV 到站选用容量为 A 的充电桩时 $M=A$, 当第 n 辆 EV 到站选用容量为 B 的充电桩时 $M=B$; P_M 为容量为 M 的充电桩在恒流充电阶段的功率; $P_M(t)$ 为恒压充电阶段容量为 M 的充电桩的实时功率, 其计算方法可参考文献[19]。

需要指出的是, 式(11)涉及的充电高峰时段是根据具体时段进行判断的, 包括如下 3 个步骤: ①预测 EV 充电需求的时空分布、每辆 EV 的平均充电时长和所充电量; ②求取目标区域内各时段有充电需求的 EV 数量; ③统计任意平均充电时长内有充电需求的 EV 数量的最大值, 将该类时段设定为充电高峰时段。

4) 分别对目标区域内 EV 在每天的相同时刻产生的不同功率的充电需求、停车持续时间和充电时长进行叠加并储存, 然后进行下一次循环, 直至循环结束。

5) 对所有循环得到的目标区域内 EV 在每天的

相同时刻产生的同一功率的充电需求、停车持续时间和充电时长取平均值,并结合各路口节点的车流量占目标区域全天总车流量的比例,得到EV充电需求的时空分布、EV选用不同容量充电桩的平均充电时长以及平均停车持续时间。

4 EVCS选址定容双层规划优化模型

4.1 上层优化模型

4.1.1 目标函数

本文综合考虑EVCS投资经营者和EV用户的利益,建立EVCS上层优化模型的目标函数,如式(16)所示。

$$\min W = W_1 + W_2 \quad (16)$$

$$W_1 = \sum_{i=1}^{n_e} (C_i^{co} + C_i^{om} + C_i^{lp}) \frac{r_0(1+r_0)^y}{(1+r_0)^y - 1} \quad (17)$$

$$W_2 = \sum_{i=1}^{n_e} C_i^{evu} \quad (18)$$

式中: W 为目标区域内EVCS投资经营者的年化总成本与EV用户的年损失成本之和,下文将其简称为总经济成本; W_1 为EVCS投资经营者的年化总成本,包括EVCS的建设成本、运行维护成本和土地购买成本; W_2 为EV用户的年损失成本; C_i^{co} 、 C_i^{om} 、 C_i^{lp} 分别为第*i*座EVCS的建设成本、运行维护成本、土地购买成本; n_e 为目标区域内规划的EVCS数量; r_0 和 y 分别为EVCS的平均贴现率和运行年限; C_i^{evu} 为第*i*座EVCS服务范围内EV用户的年空驶成本与年时间成本之和(即EV用户的年损失成本)。

1) EVCS的建设成本。

EVCS的建设成本主要包括固定投资成本、充电桩购买成本以及EVCS内与充电桩总额定功率有关的成本。因此,第*i*座EVCS的建设成本 C_i^{co} 可以表示为:

$$C_i^{co} = C_T + C_{P,i} + f_i(P_i^p) \quad (19)$$

$$f_i(P_i^p) = \omega P_i^p \quad (20)$$

式中: C_T 为投资运营每座EVCS的固定投资成本,包括购买站内各种平台辅助设施的成本以及修建各种必要设施的成本; $C_{P,i}$ 为第*i*座EVCS的充电桩购买成本; $f_i(P_i^p)$ 为第*i*座EVCS内与充电桩总额定功率有关的成本,包括购买配电变压器、有源滤波装置、电缆等设施的成本; ω 为与充电桩总额定功率有关的等效投资系数; P_i^p 为第*i*座EVCS内充电桩的总额定功率。

EVCS的充电桩购买成本取决于安装充电桩的容量和数量,因此 $C_{P,i}$ 可表示为:

$$C_{P,i} = C_{P,A} N_i^{P,A} + C_{P,B} N_i^{P,B} \quad (21)$$

式中: $C_{P,A}$ 、 $C_{P,B}$ 分别为容量为A、B的充电桩的单价; $N_i^{P,A}$ 、 $N_i^{P,B}$ 分别为第*i*座EVCS要购买的容量为A、B的

充电桩数量。

在配置EVCS内充电桩数量的过程中,本文考虑了各座EVCS服务范围内每天不同时刻产生的不同功率的充电需求、2种容量充电桩的平均服务时间、EV选用不同容量充电桩进行充电时的平均停车持续时间、充电桩出现故障而进行检修维护等因素,然后采用排队论方法求取各座EVCS应购买的2种容量充电桩的数量。本文将EV的平均停车持续时间与接受充电服务的平均时间之间的差值定义为EV用户可接受的平均排队时长。则第*i*座EVCS内容量为A、B的充电桩最优数量应分别满足式(22)和式(23),考虑充电桩出现故障而进行检修维护等因素后第*i*座EVCS最终规划的充电桩数量应满足式(24)。

$$\begin{cases} L_e(n_i^{P,A}) \leq T_{P,A}^{av} - T_{C,A}^{av} \\ L_e(n_i^{P,A} + 1) > T_{P,A}^{av} - T_{C,A}^{av} \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} L_e(n_i^{P,B}) \leq T_{P,B}^{av} - T_{C,B}^{av} \\ L_e(n_i^{P,B} + 1) > T_{P,B}^{av} - T_{C,B}^{av} \end{cases} \quad (23)$$

$$\begin{cases} N_i^{P,A} = (1 + \psi) n_i^{P,A} \\ N_i^{P,B} = (1 + \psi) n_i^{P,B} \end{cases} \quad (24)$$

式中: $L_e(n_i^{P,A})$ 、 $L_e(n_i^{P,A} + 1)$ 分别为当第*i*座EVCS容量为A的充电桩数量为 $n_i^{P,A}$ 、 $n_i^{P,A} + 1$ 时,站内选用容量为A的充电桩进行充电的EV用户可接受的平均排队时长; $T_{P,A}^{av}$ 、 $T_{C,A}^{av}$ 分别为站内选用容量为A的充电桩进行充电的EV的平均停车持续时间、平均充电时长; $L_e(n_i^{P,B})$ 、 $L_e(n_i^{P,B} + 1)$ 分别为当第*i*座EVCS容量为B的充电桩数量为 $n_i^{P,B}$ 、 $n_i^{P,B} + 1$ 时,站内选用容量为B的充电桩进行充电的EV用户可接受的平均排队时长; $T_{P,B}^{av}$ 、 $T_{C,B}^{av}$ 分别为站内选用容量为B的充电桩进行充电的EV的平均停车持续时间、平均充电时长; ψ 为站内充电桩的数量裕量。

2) EVCS的运行维护成本。

EVCS的运行维护成本与其建设成本密切相关,EVCS的建设成本越高,说明投入的设施和需要的工作人员越多,则所需的运行维护成本也越高。因此,第*i*座EVCS的运行维护成本可以按照其建设成本进行折算,可表示为:

$$C_i^{om} = a C_i^{co} \quad (25)$$

式中: a 为运行维护成本占建设成本的比例系数。

3) EVCS的土地购买成本。

EVCS需要购买土地的面积主要与站内的车位数量和相关建筑设施、辅助设施、道路、绿化等占地面积有关。因此,第*i*座EVCS的土地购买成本 C_i^{lp} 可表示为:

$$C_i^{lp} = (1 + \phi) m^{ev} n_i^{ps} k_i \quad (26)$$

$$k_i \in \{k_{re}, k_{ie}, k_{in}\} \quad (27)$$

式中: ϕ 为EVCS内相关建筑设施、辅助设施、道路、绿化以及其他设施占地面积折算到车位面积的比例系数; m^{ev} 为EVCS内单个车位的面积; n_i^{ps} 为第*i*座EVCS内的车位数量; k_i 为第*i*座EVCS所在区域的土地单价; k_{re} 、 k_{ic} 、 k_{in} 分别为居民区、商业区、工业区的土地单价。

本文考虑在产生充电需求时用户就会将EV停至EVCS,然后站内相关人员会对EV进行充电安排。由于EV的停车持续时间可能大于充电时长,因此需要规划多余的车位,则EVCS内的车位数量可以表示为:

$$n_i^{ps} = n_i^{ps,A} + n_i^{ps,B} \quad (28)$$

$$n_i^{ps,A} = \max \left\{ n_{i,A}^{[T, T_{P,A}^{av} + T]} \right\} \quad (29)$$

$$n_i^{ps,B} = \max \left\{ n_{i,B}^{[T, T_{P,B}^{av} + T]} \right\} \quad (30)$$

式中: $n_i^{ps,A}$ 、 $n_i^{ps,B}$ 分别为第*i*座EVCS内选用容量为*A*、*B*的充电桩进行充电的EV的车位数量; $n_{i,A}^{[T, T_{P,A}^{av} + T]}$ 为在任意 $[T, T_{P,A}^{av} + T]$ 时段内到达第*i*座EVCS且会选用容量为*A*的充电桩进行充电的EV数量; $n_{i,B}^{[T, T_{P,B}^{av} + T]}$ 为在任意 $[T, T_{P,B}^{av} + T]$ 时段内到达第*i*座EVCS且会选用容量为*B*的充电桩进行充电的EV数量。

4)EV用户的年损失成本。

EV用户的年损失成本主要由EV用户行驶至EVCS接受充电服务的途中产生的空驶成本和时间成本组成,则第*i*座EVCS服务范围内EV用户的年损失成本 C_i^{evu} 可表示为:

$$C_i^{evu} = 365 \sum_{n=1}^{n_{ev,i}} (d_{EV}^n C_V D + t_{EV}^n C_t) \quad (31)$$

式中: $n_{ev,i}$ 为第*i*座EVCS每天服务的EV数量; d_{EV}^n 为第*n*辆EV到达第*i*座EVCS的距离; D 、 C_V 分别为目标区域内EV每行驶1 km的平均耗电量、EV到站充电的平均电价; t_{EV}^n 为第*n*辆EV到达第*i*座EVCS的时间; C_t 为目标区域内EV用户的单位时间成本。

4.1.2 约束条件

基于目标区域内交通、经济、政治、发展等因素,对上层优化模型设置相邻EVCS之间的距离约束、EVCS数量约束、EVCS容量约束和单台充电桩的充电功率约束。

1)相邻EVCS之间的距离约束。

为了同时满足EV用户日常出行的便利性以及EVCS投资运营者的经济性,相邻2座EVCS之间的距离既不能太远也不能太近,且合理设置相邻2座EVCS之间的距离还能在很大程度上降低模型的求解难度。故相邻EVCS之间的距离 D_L 需满足:

$$\frac{d_{EV}^E}{\lambda_{ij}} \leq D_L \leq \frac{2d_{EV}^E}{\lambda_{ij}} \quad (32)$$

式中: d_{EV}^E 为EV的最佳续驶里程,其具体含义以及

表达式可参考文献[20]; λ_{ij} 为第*i*座EVCS与第*j*座EVCS之间道路的曲折系数。

2)EVCS数量约束。

目标区域内EVCS的数量与每座EVCS的容量以及该区域内EV每天的总充电需求有关,合理配置EVCS数量不仅能同时兼顾EVCS投资运营者和EV用户的利益,还能最大限度地发挥土地效益,并对配电网的二次规划起到有利的作用。因此,目标区域内规划的EVCS数量 n_e 需满足:

$$n_e^{\min} \leq n_e \leq n_e^{\max} \quad (33)$$

$$n_e^{\min} = \lceil P_z / S_{\max} \rceil \quad (34)$$

$$n_e^{\max} = \lceil P_z / S_{\min} \rceil \quad (35)$$

$$P_z = \sum_{n=1}^{n_e} P_n \quad (36)$$

式中: $n_e^{\min}$ 、 $n_e^{\max}$ 分别为目标区域内可规划EVCS数量的最小值、最大值; P_z 为目标区域内EV每天的总充电需求; $S_{\max}$ 、 $S_{\min}$ 分别为EVCS的最大容量、最小容量限制; $\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整。

3)EVCS容量约束。

EVCS的容量主要取决于充电桩的数量以及充电桩每天的工作时长:若EVCS内的充电桩数量太少,则不仅会造成EVCS投资运营者的初始投资成本太大而回报率过低的情况,还会导致EV排队时间过长的现象,进而使得EV用户的满意度降低;若EVCS内的充电桩数量太多,则会导致单台充电桩的利用率降低,不仅会损害EVCS投资经营的利益,还会导致社会资源的浪费。因此,需要合理规划EVCS容量,第*i*座EVCS的容量 S_i 需满足:

$$S_i^{\min} \leq S_i \leq S_i^{\max} \quad (37)$$

$$S_i^{\min} = \min \{ N_i^{P,A} P_A T_i^A + N_i^{P,B} P_B T_i^B \} \quad (38)$$

$$S_i^{\max} = \max \{ N_i^{P,A} P_A T_i^A + N_i^{P,B} P_B T_i^B \} \quad (39)$$

式中: $S_i^{\min}$ 、 $S_i^{\max}$ 分别为第*i*座EVCS容量的最小值、最大值; T_i^A 、 T_i^B 分别为目标区域的第*i*座EVCS内容量为*A*、*B*的充电桩平均每天的工作时长。

4)单台充电桩的充电功率约束。

在选择EVCS内不同容量的充电桩时,需要根据规划地区的整体负荷情况,在一定的范围内选择单台充电桩的充电功率,避免对规划地区电网的稳定性造成影响。单台充电桩的充电功率 P_p 需满足:

$$P_p^{\min} \leq P_p \leq P_p^{\max} \quad (40)$$

式中: $P_p^{\min}$ 、 $P_p^{\max}$ 分别为单台充电桩充电功率的最小值、最大值。

4.2 下层优化模型

对EVCS容量进行配置之前,应先确定各座EVCS的服务范围,然后结合第3节的EV充电需求预测结果,求解各座EVCS的最优容量配置。

从EV用户的角度出发,假设当EV产生充电需

求时,用户会优先选择距其最近的 EVCS 进行充电(就近原则),以此作为优化目标确定各座 EVCS 的服务范围。那么下层优化模型的目标函数可以表示为:

$$\min F_{10} = \sum_{n=1}^{n_c} d_{EV}^n \quad (41)$$

$$[i(n), d_{EV}^n] = \min \{ d_{EV}^{i,n} \} \quad i=1, 2, \dots, n_c \quad (42)$$

式中: F_{10} 为目标区域内每天产生充电需求的 EV 到达其目标 EVCS 的总距离; $i(n)$ 为第 n 辆 EV 的目标充电站编号^[11]。

5 模型求解

EVCS 选址定容规划是一个含多约束条件的复杂非线性优化问题,且上、下层优化模型的目标函数具有很强的耦合性,因此在求解过程中不能单一地针对某一层目标函数进行求解。本文采用 SA 算法和 Dijkstra 算法的组合算法对 EVCS 选址定容双层规划优化模型进行联合求解,求解流程图如图 2 所示。

当 SA 算法在相同的温度下进行迭代寻优时,会根据 Metropolis 准则以一定的概率接受较差解,这样可以使其在寻优过程中逃脱局部极值,避免过早收敛,提高其全局寻优能力。Metropolis 准则中接受较差解(新解)的概率 p 可表示为:

$$p = \begin{cases} 1 & E_n \geq E_o \\ e^{-(E_n - E_o)/(KT_T)} & E_n < E_o \end{cases} \quad (43)$$

式中: E_n 为新解的内能; E_o 为原解的内能; K 为温度衰减系数; T_T 为当前系统的温度。

模型的求解步骤为:上层优化模型采用 SA 算法,在备选站址已知的基础上随机产生 1 组选址方案,并将这 1 组方案传入下层;下层采用 Dijkstra 算法,根据已有的街道信息和上层方案形成的邻接矩阵,求解每辆 EV 到达各座 EVCS 的距离,并以距其最近的 EVCS 作为其目标充电站,对各座 EVCS 的服务范围进行划分,然后将各座 EVCS 服务范围内的充电负荷返回给上层模型进行定容优化;在当前温度下计算得到最优适应度值后,执行降温操作;重复上述过程以得到最终的 EVCS 选址定容结果。

6 算例分析

6.1 基础数据

为了验证本文所提规划方法的合理性,对北方某城市内占地面积为 22.68 km² 的经济技术开发区的 EVCS 进行规划。目标区域的地形图见附录 A 图 A1。该区域由 15 个居民区、4 个休闲区、18 个商业区、5 个工业区及 3 个绿化区组成,区域内共有

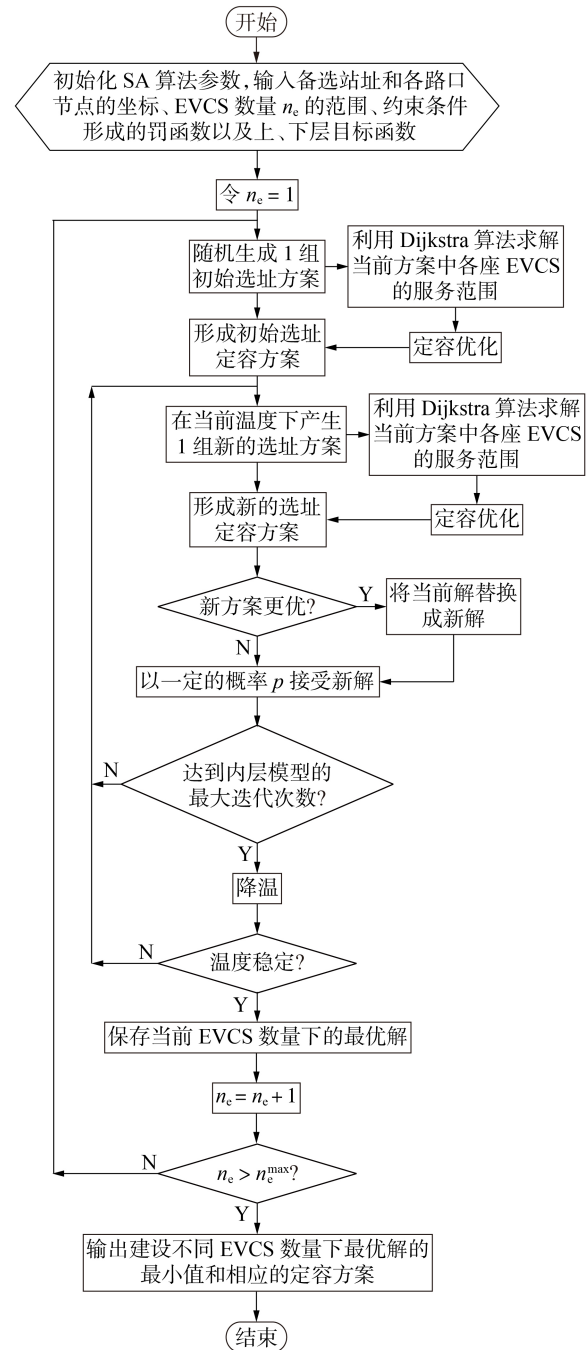


图 2 EVCS 选址定容双层规划优化模型的求解流程图

Fig.2 Flowchart of solving two-layer planning optimization model for EVCSs' site selection and capacity determination

81 条主要交通干道和 37 个路口节点(编号见图 A1 中的数字), 18 个备选站址分布在各区域内。目标年各路口节点的预计车流量数据见附录 A 表 A1, 与 EVCS 选址定容模型相关的参数设置见附录 A 表 A2。

6.2 EV 充电负荷预测结果及分析

对距目标区域最近的 EVCS 内 EV 的充电数据进行统计和分析, 然后对在不同时刻进行充电的 EV

数量进行拟合,得到不同起始充电时刻有充电需求的EV数量直方图和拟合概率密度函数曲线,如图3所示。

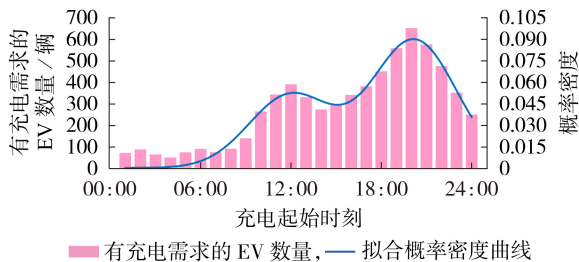


图3 不同起始充电时刻有充电需求的EV数量直方图和拟合概率密度函数曲线

Fig.3 Histogram of EV quantity with charging demand at different initial charging time and fitting probability density function curve

由图3所示拟合结果可知,目标区域内EV的起始充电时刻与有充电需求的EV数量之间的关系近似服从双峰正态分布,且该目标区域内公共型充电站的EV负荷主要集中在下午至晚上时段。

假设目标区域内电动私家车和电动商务车的电池容量服从 $[45, 55]$ kW·h范围内的均匀分布,且EV在目标区域的停车持续时间满足均值 $\mu_{\text{stop}} = 2.74$ min、标准差 $\sigma_{\text{stop}} = 1.20$ min的对数正态分布。根据第3节,采用蒙特卡罗方法对目标区域内的EV充电需求进行预测,可以得到单辆EV产生充电需求时选用不同容量充电桩进行充电的日平均负荷曲线,如图4所示。

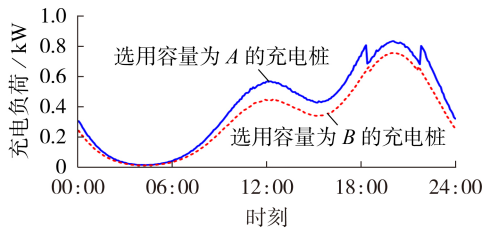


图4 目标区域内单辆EV的日平均负荷曲线
Fig.4 Daily average load curves of single EV in target area

由图4可知:目标区域内EV的充电负荷曲线与其起始充电时刻的概率密度函数曲线一样都呈双峰状分布,2个峰值时刻分别为12:00和20:00,且第2个负荷峰值高于第1个负荷峰值;选用容量为A的充电桩的EV用户距下一段行程的出行时间相对比较宽松,而选用容量为B的充电桩的EV用户距下一段行程的出行时间相对较紧张,因此选用容量为A的充电桩的单辆EV日平均负荷曲线高于选用容量为B的充电桩的单辆EV日平均负荷曲线。

本文设定的管理策略会导致在平时段的EV充电

电量多余峰时段,图4中的2条负荷曲线在18:00—22:00时段内都有波动,且2条负荷曲线在充电峰时段的最大负荷均大于平时段的最大负荷。因此,在本文设定的EVCS管理策略下,选用充电桩峰时段的充电需求进行定容后也能满足平时段的EV充电需求。

在本文设定的EVCS管理策略下,在目标区域内选用2种容量充电桩的平均充电速率和EV的平均停车持续时间的预测结果如表1所示。由表可知:相较于平时段,EV充电峰时段内站内容量为A、B的充电桩的平均充电速率均都有所提高,分别提高了29.3%、11.7%,这表明本文设定的管理策略能在充电峰时段较大地提升2种容量充电桩的平均充电速率,虽然牺牲了一部分EV用户的利益,但会在很大程度上降低EVCS投资经营者的成本且大概率不会影响EV用户之后的出行安排;EV在站内的停车持续时间都长于其充电时长,所以本文需要为完成充电但是用户还未返回的EV设立多余的等待车位。

表1 平均充电速率和EV平均停车持续时间的预测结果

Table 1 Forecasting results of average charging rate and EVs' average stop duration

选用的充电桩容量	平均充电速率 / (min·辆 ⁻¹)		平均停车持续时间 / min	
	峰时段	平时段	峰时段	平时段
A	41.4	58.6	99.7	99.7
B	18.8	21.3	22.2	22.2

为了对本文所提规划方法进行验证,在设定的EVCS管理策略下设置如下3种规划方法进行对比分析:①本文方法,对EVCS的位置以及站内2种容量的充电桩进行规划;②对比方法1,EVCS内仅有容量为B的充电桩,对EVCS的位置以及充电桩进行规划;③对比方法2,EVCS内仅有容量为A的充电桩,对EVCS的位置以及充电桩进行规划。

6.3 EVCS的规划结果及分析

根据已给定的备选站址随机生成1个初始解,并根据图2所示流程图优化迭代200次,最终得到3种规划方法下总经济成本 W 随充电站数量 n_c 的变化曲线,如图5所示。

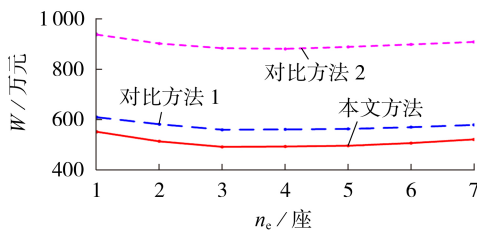


图5 3种规划方法下 W 随 n_c 的变化曲线

Fig.5 Variation curves of W vs. n_c under three planning methods

由图5可知,3种规划方法下目标区域内EVCS投资经营者和EV用户的总经济成本随着 n_e 都呈现先下降后上升的趋势。当 $n_e=3$ 座时,本文方法和对比方法1的总经济成本同时取得最小值;当 $n_e=4$ 座时,对比方法2的总经济成本取得最小值。因此,本

文方法和对比方法1下目标区域应规划的EVCS最优数量为3座,对比方法2下目标区域内应规划的EVCS最优数量为4座。最终求解所得3种规划方法下各EVCS的位置及其服务范围见附录A图A2。3种规划方法的最优选址定容结果分别见表2—4。

表2 本文方法的EVCS选址定容结果

Table 2 EVCSs' site selection and capacity determination results of proposed method

规划的EVCS	坐标/km	充电桩数量/台		车位个数	占地面积/ m^2	所属区域	年建设成本/万元	年运行维护成本/万元	EV用户年损失成本/万元	总经济成本/万元
		容量为A	容量为B							
A ₁	(1.35, 2.45)	28	9	87	1461.6	商业区	114.0	34.2	46.2	194.4
A ₂	(4.50, 3.55)	21	7	65	1092.0	居民区	76.7	23.0	34.1	133.8
A ₃	(3.90, 0.80)	26	9	82	1377.6	居民区	93.2	28.0	37.7	158.9
合计	—	75	25	234	3931.2	—	283.9	85.2	118.0	487.1

表3 对比方法1的EVCS选址定容结果

Table 3 EVCSs' site selection and capacity determination results of Comparison Method 1

规划的EVCS	坐标/km	容量为B的充电桩数量/台	车位个数	占地面积/ m^2	所属区域	年建设成本/万元	年运行维护成本/万元	EV用户年损失成本/万元	总经济成本/万元
B ₁	(1.35, 2.45)	45	75	1260.0	商业区	131.3	39.4	46.2	216.9
B ₂	(4.50, 3.55)	34	56	940.8	居民区	91.4	27.4	34.1	152.9
B ₃	(3.90, 0.80)	43	70	1176.0	居民区	112.8	33.8	37.7	184.3
合计	—	122	201	3376.8	—	335.5	100.6	118.0	554.1

表4 对比方法2的EVCS选址定容结果

Table 4 EVCSs' site selection and capacity determination results of Comparison Method 2

规划的EVCS	坐标/km	容量为A的充电桩数量/台	车位个数	占地面积/ m^2	所属区域	年建设成本/万元	年运行维护成本/万元	EV用户年损失成本/万元	总经济成本/万元
C ₁	(0.60, 3.40)	62	72	1209.6	居民区	134.3	40.3	31.8	206.4
C ₂	(4.50, 3.55)	74	85	1428.0	居民区	158.1	47.4	34.1	239.6
C ₃	(3.90, 0.80)	61	70	1176.0	工业区	138.5	41.6	26.3	206.4
C ₄	(2.25, 1.00)	70	81	1360.8	居民区	150.2	45.1	22.7	218.0
合计	—	267	308	5174.4	—	581.1	174.4	114.9	870.4

由表2—4可知:本文方法的总经济成本为487.1万元,相较于对比方法1和对比方法2分别减少了67.0、383.3万元;相较于本文方法和对比方法1,对比方法2的EV用户年损失成本最优,但其年建设成本和年运行维护成本都大幅增大。因此,在对EVCS进行规划时,根据不同EV用户的行为特征对不同容量的充电桩进行规划比对单一容量充电桩进行规划的经济性更好,可见本文方法在兼顾了EVCS投资运营者与EV用户利益的同时,能够有效地降低EVCS投资运营者的成本。

6.4 求解算法的性能分析

本文将SA算法和Dijkstra算法相结合,对EVCS的选址定容双层规划优化模型进行联合求解,为了验证本文算法的优越性,设置如下2种算法进行对比分析:对比算法1采用遗传算法与Dijkstra算法相结合进行求解;对比算法2采用粒子群优化算法与Dijkstra算法相结合进行求解。3种算法的结果对比如表5所示。其中:对比算法1和对比算法2的种群规模均为100,最大迭代次数均为200次;本文算法

的马尔科夫链长度为100,初始温度为100℃,温度衰减系数为0.99。

表5 3种算法的结果对比

Table 5 Result comparison among three algorithms

算法	求解时间/s	本文方法的总经济成本/万元
对比算法1	602.6	496.2
对比算法2	56.0	488.4
本文算法	47.9	487.1

由表5所示结果可知,本文算法的求解时间最短,为47.9s,且在本文方法下求解所得总经济成本最小,为487.1万元。可见,本文采用SA算法和Dijkstra算法相结合对模型进行求解的效果最好。

7 结论

本文提出了一种含不同容量充电桩的EVCS选址定容优化方法,所得主要结论如下:

1)所设定的管理策略能够在EVCS的充电峰时段提升站内充电桩的充电速率,提高充电桩全天的利用率,降低EVCS投资经营者的成本;

2)通过计算EV到站充电时选用不同容量充电桩充电的概率,能够计算得到EV在不同充电功率下的充电需求占比;

3)通过建立充电需求时空预测模型对EV充电需求的时空分布、不同容量充电桩的充电速率和EV用户选用不同容量充电桩时的平均停车持续时间进行客观地描述及分析,能够提高EVCS选址定容的精确性与合理性;

4)所建立的EVCS选址定容双层规划优化模型,在兼顾了EVCS投资运营者的经济性和EV用户充电行驶的便捷性且能满足目标区域全天充电需求的同时,还考虑了EV用户对充电时间的利用;

5)基于SA算法和Dijkstra算法的组合算法,能够有效地解决含范围划分的多约束条件下复杂非线性性和强耦合性的EVCS选址定容双层规划问题。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 肖白,郭蓓.配电网规划研究综述与展望[J].电力自动化设备,2018,38(12):200-211,217.
XIAO Bai, GUO Bei. Review and prospect of distribution network planning[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(12):200-211, 217.
- [2] 中国政府网.国务院办公厅关于印发新能源汽车产业发展规划(2021—2035年)的通知(国办发[2020]39)[EB/OL]. (2020-11-02)[2021-05-07]. http://www.gov.cn/jzhengce/content/2020-11/02/content_5556716.htm.
- [3] 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.
- [4] 栗然,臧向迪,张文昕,等.共享电动汽车混合充换电站选址优化[J].电力自动化设备,2021,41(10):67-74.
LI Ran, ZANG Xiangdi, ZHANG Wenxin, et al. Location optimization of hybrid charging and changing station for shared electric vehicles[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10):67-74.
- [5] 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(增刊1):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(Supplement 1):272-281.
- [6] 邢强,陈中,黄学良,等.基于数据驱动方式的电动汽车充电需求预测模型[J].中国电机工程学报,2020,40(12):3796-3813.
XING Qiang, CHEN Zhong, HUANG Xueliang, et al. Electric vehicle charging demand forecasting model based on data-driven approach[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(12):3796-3813.
- [7] 田梦瑶,汤波,杨秀,等.综合考虑充电需求和配电网接纳能力的电动汽车充电站规划[J].电网技术,2021,45(2):498-509.
TIAN Mengyao, TANG Bo, YANG Xiu, et al. Planning of electric vehicle charging stations considering charging demands and acceptance capacity of distribution network[J]. Power System Technology, 2021, 45(2):498-509.
- [8] 赵峰,李建霞,高峰阳.考虑不确定性的公路光储充电站选址定容[J].电力自动化设备,2021,41(8):111-117.
ZHAO Feng, LI Jianxia, GAO Fengyang. Siting and sizing of photovoltaic-storage charging stations on highway considering uncertainties[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(8):111-117.
- [9] 葛少云,申凯月,刘洪,等.考虑网络转移性能的城市快速充电网络规划[J].电网技术,2021,45(9):3553-3564.
GE Shaoyun, SHEN Kaiyue, LIU Hong, et al. Urban fast charging network planning considering network transfer performance[J]. Power System Technology, 2021, 45(9):3553-3564.
- [10] 苏粟,李玉璟,贾泽瑞,等.基于GPS轨迹挖掘的电动出租车充电站规划[J/OL].电力自动化设备. [2022-05-28]. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202205005>.
- [11] 何晨可,韦钢,朱兰,等.电动汽车充换放储一体化电站选址定容[J].中国电机工程学报,2019,39(2):479-489,645.
HE Chenke, WEI Gang, ZHU Lan, et al. Locating and sizing of electric vehicle charging-swapping-discharging-storage integrated station[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(2):479-489, 645.
- [12] 徐元中,曹翰林,吴铁洲.基于SA-BP神经网络算法的电池SOH预测[J].电源技术,2020,44(3):341-345.
XU Yuanzhong, CAO Hanlin, WU Tiezhou. Estimation of SOH for battery based on SA-BP neural network[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2020, 44(3):341-345.
- [13] PANDŽIĆ H, BOBANAC V. An accurate charging model of battery energy storage[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(2):1416-1426.
- [14] 肖白,朱珈汛,姜卓,等.考虑车辆充电调度机制的电动公交车充电站规划[J].电力自动化设备,2022,42(1):148-155.
XIAO Bai, ZHU Jiaxun, JIANG Zhuo, et al. Planning of electric bus charging station considering vehicle charging scheduling mechanism[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(1):148-155.
- [15] 罗江鹏,张玮,王国林,等.基于出行链数据的电动汽车充电需求预测模型[J].重庆理工大学学报(自然科学版),2020,34(6):1-8.
LUO Jiangpeng, ZHANG Wei, WANG Guolin, et al. An electric vehicle charging demand forecast model based on trip chain data[J]. Journal of Chongqing Institute of Technology, 2020, 34(6):1-8.
- [16] 陶顺,肖湘宁,温剑锋,等.电动汽车分散充电设施配比度分析与计算方法[J].电工技术学报,2014,29(8):11-19.
TAO Shun, XIAO Xiangning, WEN Jianfeng, et al. Configuration ratio for distributed electrical vehicle charging infrastructures[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8):11-19.
- [17] 严干贵,刘华南,韩凝晖,等.计及电动汽车时空分布状态的充电站选址定容优化方法[J].中国电机工程学报,2021,41(18):6271-6284.
YAN Gangui, LIU Huanan, HAN Ninghui, et al. An optimization method for location and capacity determination of charging stations considering spatial and temporal distribution of electric vehicles[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18):6271-6284.
- [18] 刘向军,牟明亮,黄绍模,等.考虑充电功率衰减的电动汽车两阶段优化调度策略[J].电网技术,2021,45(7):2656-2666.
LIU Xiangjun, MU Mingliang, HUANG Shaomo, et al. Two-stage optimal scheduling strategy of electric vehicle considering

charging power decay[J]. Power System Technology, 2021, 45(7):2656-2666.

- [19] CHANG W Y. The state of charge estimating methods for battery: a review[J]. ISRN Applied Mathematics, 2013, 2013: 1-7.

- [20] 刘志鹏, 文福拴, 薛禹胜, 等. 电动汽车充电站的最优选址和定容[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(3):54-59.

LIU Zhipeng, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. Optimal siting and sizing of electric vehicle charging stations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(3):54-59.

作者简介:



肖 白

肖 白(1973—),男,教授,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统规划、空间电力负荷预测、多能源互补协调发电、电能质量综合治理等(E-mail:xbxiaobai@126.com);

高 峰(1998—),男,硕士研究生,主要研究方向为电动汽车充电站规划(E-mail:1766810232@qq.com)。

(编辑 陆丹)

Optimization method of electric vehicle charging stations' site selection and capacity determination considering charging piles with different capacities

XIAO Bai, GAO Feng

(School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: Aiming at the problem that the optimal number, site and capacity of EVCSs (Electric Vehicle Charging Stations) are difficult to determine, an optimization method of EVCSs' site selection and capacity determination considering charging piles with different capacities is proposed under the condition that the alternative sites are fixed. Firstly, according to the behavior characteristics of EVs (Electric Vehicles) and the capacity of charging piles to be planned, the probability of selecting charging piles with different capacities when EVs have charging demand is calculated. The temporal and spatial distribution of EV charging demand, the average charging rate of charging piles with different capacities and the average parking duration when EV users select different capacity of charging piles are forecasted by Monte Carlo method combined with the city's expected traffic flow in the target year. Then, the two-layer planning model of EVCSs' site selection and capacity determination is established. The upper-layer model optimizes the EVCSs' site with the goal of minimizing the sum of EVCSs' annual total cost and EV users' annual loss cost. The lower-layer model divides the service range of each EVCS by taking the shortest driving distance of EV users to the stations as the objective, and returns the charging load within the service range of each EVCS to the upper-layer model for capacity determination optimization combined with the forecasting results. Finally, the simulated annealing algorithm and Dijkstra algorithm are combined to solve the two-layer planning model. The correctness and effectiveness of the proposed method are verified by the example analysis results.

Key words: electric vehicles; charging stations; site selection and capacity determination; charging demand forecasting; two-layer planning; simulated annealing algorithm; Dijkstra algorithm

附录 A

$$f_{\text{soc}}(S_{\text{start}})=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\text{soc}}}\text{e}^{-\frac{(S_{\text{start}}-\mu_{\text{soc}})^2}{2\sigma_{\text{soc}}^2}}$$

(A1)

式中： $\sigma_{\text{soc}}=0.15$ ； $\mu_{\text{soc}}=0.3$ 。

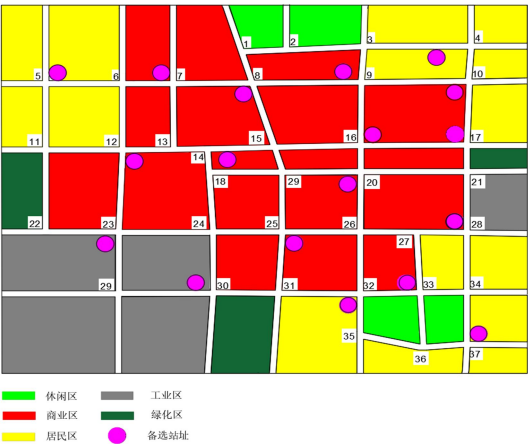


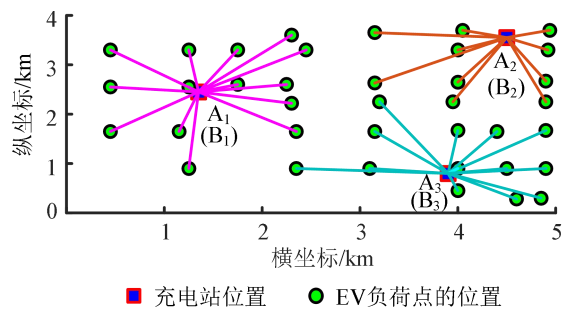
图 A1 目标区域地形图
Fig.A1 Topographic map of target area

表 A1 目标区域内各街道的车流量预测结果
Table A1 Forecasting results of traffic volume of each road in target area

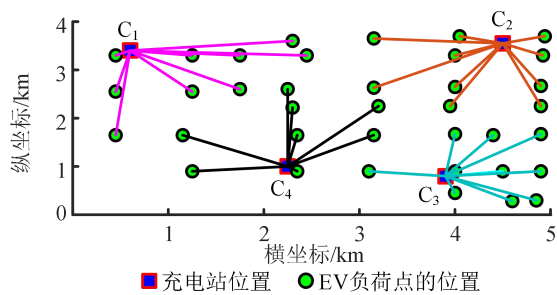
街道编号	车流量/(辆·d ⁻¹)	街道编号	车流量/(辆·d ⁻¹)	街道编号	车流量/(辆·d ⁻¹)	街道编号	车流量/(辆·d ⁻¹)
1	298	10	253	19	331	28	256
2	211	11	371	20	372	29	535
3	300	12	287	21	359	30	515
4	316	13	193	22	360	31	395
5	387	14	223	23	371	32	505
6	343	15	690	24	386	33	461
7	370	16	578	25	293	34	275
8	497	17	449	26	441	35	297
9	303	18	266	27			

表 A2 EVCS 选址定容参数
Table A2 Site selection and capacity determination parameters of EVCS

参数	数值	参数	数值	参数	数值	参数	数值
S_{CC}	85%	a	30%	β	25.2%	ϕ	40%
r_0	8.5%	m^{ev}	12m ²	γ	20 a	C_{t}	30 元/h
C_{T}	100 万元	D	0.14 kW·h/km	ω	0.13	C_{v}	1.4 元/(kW·h)
$C_{\text{p,A}}$	2 万元	ψ	0.2	$C_{\text{p,B}}$	4 万元	k_{re}	0.2 万元/m ²
P_{A}	40 kW	k_{ic}	0.3 万元/m ²	P_{B}	100 kW	k_{in}	0.25 万元/m ²



(a) 本文方法和对比方法 1



(b) 对比方法 2

图 A2 3 种规划方法的站址位置及服务范围

Fig.A2 Site location and service scope of three planning methods