

大型停车区域的电动汽车充电桩规划设计

任哲¹, 邹瑄¹, 温一凡², 王佃波², 张晓滨²

(1. 中国能源建设集团陕西省电力设计院有限公司, 陕西 西安 710054;

2. 西安理工大学电气工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要:目前电动汽车充电桩(EVCP)规划通常针对区县级较大区域开展,但对园区级区域进行EVCP规划更有利于提高投资者的积极性和周边电动汽车(EV)用户的体验。以车流量较大的大型停车区域为研究对象,通过调研获得区域内EV的电池容量、停放情况、电量分布以及充电意愿等统计数据,并基于这些数据应用蒙特卡洛法得出区域内EV充电负荷的时域分布。依据区域内的电网信息以及EV的充电负荷分布,给出以投资成本、电网网损及用户满意度综合最优为目标的EVCP规划设计方法。最后以某机场远端大型停车场为算例,验证了所提园区级EVCP规划方法的有效性,该方法相较于传统EVCP的规划方法更加经济合理。

关键词:电动汽车;充电桩规划;充电负荷预测;多目标优化

中图分类号:TM910.6

文献标志码:A

文章编号:2096-4145(2024)08-0089-09

Planning of Electric Vehicle Charging Pile for Large Parking Lots

REN Zhe¹, ZOU Xuan¹, WEN Yifan², WANG Dianbo², ZHANG Xiaobin²

(1. China Energy Engineering Group Shaanxi Electric Power Design Institute Co., Ltd., Xi'an 710054 China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710054 China)

Abstract: Electric vehicle charging piles (EVCP) planning is usually carried out for larger areas at the district and county level, but EVCP planning for park-level areas is more conducive to improving investor's motivation and the experience of neighboring electric vehicle (EV) users. Taking the large parking areas with large traffic flow as study object, the battery capacity, parking situation, state of charge distribution and charging willingness of EVs in the region are obtained through the survey. Then based on these statistical data, the Monte Carlo method is used to carry out the time domain of EV charging load distribution. Then according to the grid information and the EV charging load distribution in the region, the EVCP planning method is proposed with the comprehensive optimization of investment, grid line loss and user satisfaction. Finally, a large parking lot of an airport is taken as an example to verify the effectiveness of the proposed EVCP planning method. Compared with the traditional EVCP planning, the proposed method is more economical and reasonable.

Key words: electric vehicle; charging pile planning; charging load forecasting; multi-objective optimization

0 引言

当前化石能源日渐匮乏,环境污染问题愈发严重,作为燃油汽车的升级替代产品,电动汽车

(Electric Vehicle, EV)的保有量未来会保持快速上升的趋势^[1]。在此背景下, EV发展与充电桩(Electric Vehicle Charging Piles, EVCP)规划建设的不匹配问题日益凸显。

在EVCP的规划设计过程中,核心问题是预测EV的充电需求即充电负荷,一般通过分析规划区域中道路交通网架、EV的出行规律及用户充电习惯等因素计算得出。文献[2]基于地块功能和地理属性将区域划分为住宅区、办公区、旅游区、商业区和教育区5类,并综合不同区域的车流畅度情况完成EV充电负荷的预测。文献[3]通过分析不同类

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52207222);中电工程集中开发科研项目(GSKJ2-F01-2021);西安市科技计划项目(24GXFW0067)
Project Supported by the National Natural Science Foundation of China (52207222); Centralized Development Research Project of CLP Engineering(GSKJ2-F01-2021); Xi'an Science and Technology Project (24GXFW0067)

型汽车在具体场景下的停车规律,并采用蒙特卡洛算法模拟车主驾驶、停放和充电行为预测出区域内EV充电负荷的时空分布特性。文献[4]依据交通路网拓扑和出行数据模拟EV的行驶特性,并完成EV充电需求的时空分布预测。文献[5]基于居民出行数据构建不同复杂度的出行链模型,并使用最短路径算法选择行驶路径来完成EV充电需求的预测。文献[6]根据充电站的现场实际统计数据,利用泊松分布、轮盘选择和均匀分布对EV开始充电的荷电量(State of Charge, SOC)和充电次数进行分析,建立了EV充电站的负荷预测模型。文献[7]采用大数据和机器学习技术对EV充电站的实时数据进行评估,提出一种基于数据流的流式逻辑回归模型,充电站运营商可以根据这些数据开展优化规划。文献[8]通过“滴滴开放数据平台”申请得到某城市区域在一段时间内的出行订单及GPS定位数据,在对EV行驶轨迹大数据集进行清洗与挖掘后,基于动态能耗理论构建了EV充电需求的时空分布预估模型。

文献[9]提出了以充电站建设投资成本和用户经济损失最小为目标的EVCP规划模型。文献[10]以充电站成本-收益最优为目标,给出了一种光-储一体的EVCP双层优化配置方法。文献[11]从用户的角度出发,考虑包括充电便利性、充电成本和充电时间3个指标的充换服务满意度,同时兼顾市政配电网的安全性完成EVCP规划。文献[12]建立以社会总成本最小和以距离、时间、拥挤程度3个指标最优的双层模型来完成EVCP的优化布局。文献[13]开发了联合规划模型,以母线电压偏差和线路电流为约束,确保配电系统处于合理的运行状态,同时部署EV充电站和分布式光伏站。

大型停车区域作为一类普遍存在的典型场景,EVCP的规划研究相对较少。文献[14]以铁路交通枢纽站的大型停车场为例,从停放EV的充电需求入手,结合停车数量、停放时间以及充电方式完成EVCP的规划。

针对大型停车区域这一特定场景,本文首先对区域内各类EV的电池容量、停放规律、SOC的时域分布以及用户的充电意愿等数据进行采集和统计分析,并在此基础上应用蒙特卡洛法完成区域内EV充电负荷的预测。然后基于区域内的电网信息以及EV的充电负荷,给出以投资建设成本、电网网损和用户满意度综合最优为目标的EVCP规划设计方法。最后以某机场远端大型停车场为算例,验证了本文所给EVCP规划方法的有效性。

1 EV的充电需求预测

1.1 停车区域EV充电负荷的影响因素分析

大型停车区域中EVCP的类型和位置与停车位类型及分布情况密切相关。图1为某机场大型停车区域的车位分布,包括大巴车停车位、出租车停车位和社会车辆停车位。不同类型和用途的EV具有不同的电池容量、停放模式和充电意愿,这些因素会影响电动汽车的充电需求,因此需要通过调研统计来获得这些基础数据。

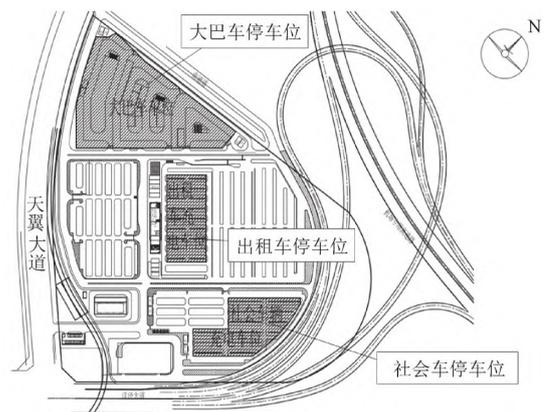


图1 某机场停车场车位分布

Fig.1 Parking spaces distribution in parking lots of an airport

首先对EV的电池容量进行调研,得到停车区域内3类车型对应的电池容量如图2所示。

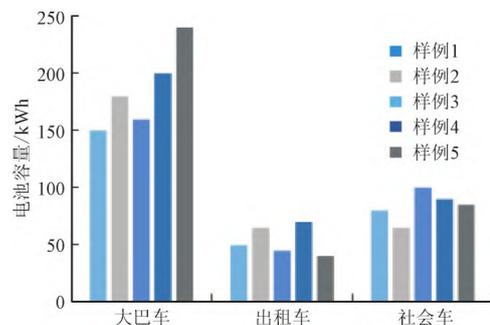


图2 不同类型EV的电池容量

Fig.2 Battery capacity of different types of EVs

图2中列出了3类车型的5种常见电池容量,规划计算时将选取平均值,社会车辆、出租车、大巴车的电池平均容量分别为80 kWh, 50 kWh和180 kWh。

然后通过现场调研和统计,获得停车区域内每日不同时间段中不同类型EV的停放信息,如图3所示。为了提高数据的准确性,图3中数据为多日的平均数据。

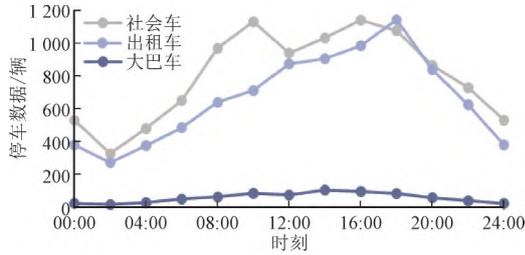


图3 不同类型EV的停放数据

Fig.3 Parking data for different types of EVs

接下来通过现场问卷调查和查阅文献等方式,统计在1d当中不同类型EV的荷电状态 S_{oc} 分布变化情况,如图4所示。

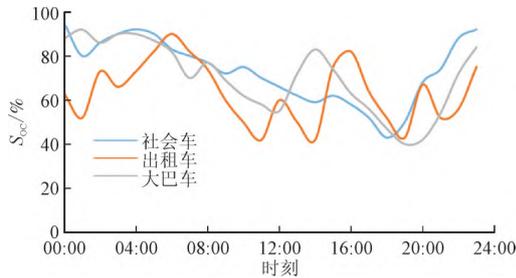


图4 不同类型EV的电量变化

Fig.4 Variations in battery level for different types of EVs

最后获取停车场中EV车主的充电意愿数据,即用户在EV电量剩余多少时进行充电的概率,通过实地问卷调查和统计,获得EV的充电意愿统计数据,如图5所示。

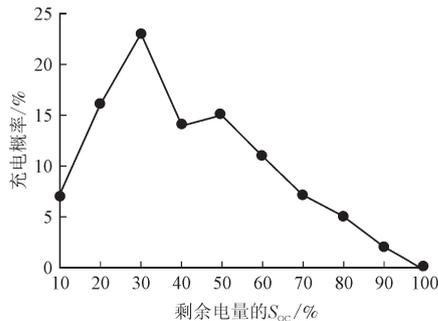


图5 EV的充电意愿统计数据

Fig.5 Charging intentional statistics of EVs

EV的充电时长 T_c 取决于电池容量、剩余电量和充电桩功率的大小,计算如式(1)所示。计算充电时长是为了得到EV充电负荷在时间轴上的分布区间。

$$T_c = \frac{(1 - S_{oc})E_h}{0.9P_{cm}} \quad (1)$$

式中: E_h 为汽车电池容量; P_{cm} 为充电桩功率。

1.2 EV充电负荷的预测

EV的充电行为是具有一定规律的随机事件,采用蒙特卡洛法(Monte Carlo, MC)对具有不确定性及时序性的EV充电负荷进行模拟。MC是以概率作为基础的统计方法,也称为随机抽样技术,模拟

次数越多,结果越切合实际^[15]。

应用MC法预测EV充电负荷的思路是,首先基于统计得到的出行数据和充电信息,建立随机过程的概率分布模型;然后按概率抽取所有影响EV充电负荷的随机变量,包含EV的停放时间、SOC分布以及充电意愿等,若发生充电行为则计算充电时长,得到每一辆EV的充电负荷曲线。最后将区域内所有EV的充电负荷曲线在时间轴上叠加即可得到整个规划区域内总的EV充电负荷的预测曲线。

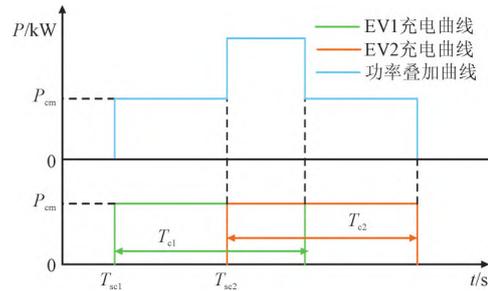


图6 EV充电功率曲线叠加过程

Fig.6 EV charging power curve stacking process

图6给出了区域EV充电负荷预测曲线的合成过程。 T_{sc1}, T_{sc2} 分别为EV₁和EV₂的起始充电时间, T_{c1}, T_{c2} 分别为计算得到的EV₁和EV₂的充电时长。2条曲线在时间轴上有重叠,因此可得充电功率的叠加曲线。随着模拟次数增多,充电曲线累计叠加,最终得到待规划区域内EV充电负荷的预测曲线。

EV充电负荷预测流程如图7,将停车区域1d当中EV的总数设置为MC的仿真次数M。取 $m=1$,表示从第一辆车开始模拟。

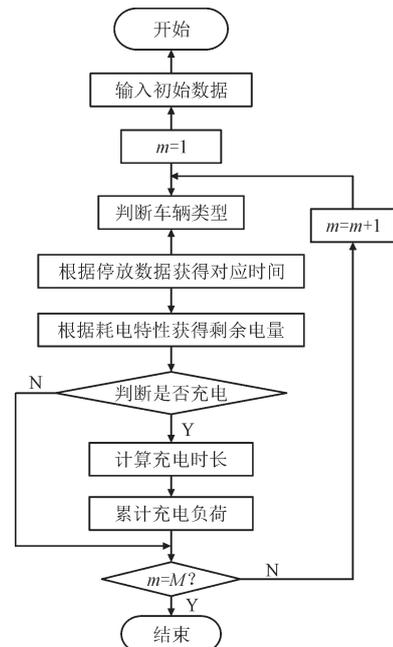


图7 EV充电负荷预测流程

Fig.7 EV charging load forecasting process

2 停车区域EVCP的规划建模

2.1 规划目标函数

EVCP的规划布局基于EV充电负荷的预测结果进行,且大都是多目标优化问题^[16]。对大型停车区域内EVCP进行规划主要包括容量和并网位置的规划。容量规划的目标是在尽可能满足区域内EV充电负荷需求的情况下,减小建设维护成本,有效提高EVCP的利用率。由于EVCP并网位置以及接入容量的不同会引起不同的网损,因此合理规划EVCP的并网位置及每个接入点的容量可以有效减少运行时的网损。本文以EVCP的投资成本、电网网损以及用户满意度综合最优为目标进行大型停车区域的EVCP规划^[17]。

2.1.1 建设投资成本

建设投资成本主要包含EVCP的购买成本、配套设施的建设成本以及运营维护成本等^[18],考虑到设备折旧得到EVCP的建设投资成本 f_1 计算公式为:

$$f_1 = \frac{r_0(1+r_0)^y}{(1+r_0)^y - 1} C_1 + C_2 \quad (2)$$

式中: C_1 为EVCP的建设成本, $C_1 = a_1 N$, N 为该停车区域EVCP的拟规划容量, a_1 为EVCP单位容量造价,包含购买成本和配套设施建设成本,一般取值2000元/kW; C_2 为运营维护成本, $C_2 = a_2 N$, a_2 为充电桩单位容量运维成本,一般取值80元/kW; y 为EVCP最高使用年限,一般取值20年; r_0 为EVCP的平均折旧率,一般取值8%。

2.1.2 电网电能损耗

大量EV接入电网进行充电,会增大电网电能损耗。基于大型停车区域内电网潮流的计算结果,得出EVCP投入使用后的网损计算公式^[19]:

$$f_2 = \sum_{l=1}^n P_{\text{loss}(l,l+1)} = \sum_{l=1}^n \frac{P_l^2 + Q_l^2}{U_l^2} R_{(l,l+1)} \quad (3)$$

式中: f_2 为EV接入电网后的网络损耗; $P_{\text{loss}(l,l+1)}$ 为节点 l 和节点 $l+1$ 之间支路的网损; $R_{(l,l+1)}$ 为节点 l 和节点 $l+1$ 之间支路的电阻; n 为节点个数; P_l, Q_l, U_l 分别为节点 l 的有功功率、无功功率及电压。

2.1.3 用户满意度

图8为EV用户的满意度。如图8所示,如果按照预测得到的EV充电负荷峰值来配置EVCP的容量,则用户的满意度高,满意度函数 f_3 设定为1;而按照EV充电负荷的最小值来配置EVCP的容

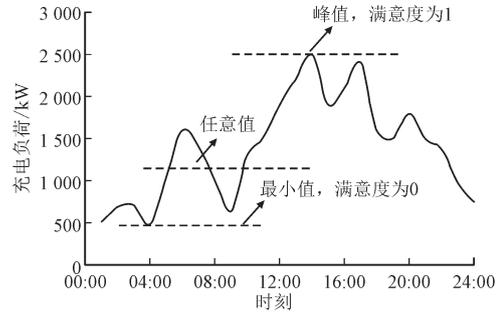


图8 EV用户的满意度
Fig.8 EV user satisfaction

量,则用户满意度差 f_3 设定为0;当EVCP的容量取EV充电负荷峰谷值之间的任意值时, f_3 为EVCP的日输出电量与EV的日需求充电量比值。 f_3 的函数表达式为:

$$f_3 = \frac{\int_0^{24} f(t)dt - \int_0^{24} u(f(t) - N)[f(t) - N]dt}{\int_0^{24} f(t)dt} \quad (4)$$

式中: $f(t)$ 为充电负荷曲线; dt 表示对时间的微元; N 为EVCP的容量,取充电负荷峰谷值之间的任意值; $u(\cdot)$ 为阶跃函数。

式(4)中分母表示停车区域内所有EV的日需求总充电量,分子表示EVCP根据EV需求以及自身容量限制所提供的日总充电量。

2.1.4 多目标优化函数

由于3个目标函数的量纲不同, f_1 单位是万元, f_2 是kW, f_3 无量纲,因此需要将目标函数进行处理,采用归一化算法将数据去量纲,同时将数据归一化至同一量级,便于不同单位或量级的指标能够进行比较和加权,解决数据间的可比性问题^[20],具体的归一化公式为:

$$X = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (5)$$

式中: x 为需要归一化的数据; x_{\min} 为最小值; x_{\max} 为最大值; X 为归一化后的结果,输出范围在[0,1]区间内。

分别将建设投资成本 f_1 和网损 f_2 归一化为 F_1 和 F_2 。投资成本 F_1 与EVCP容量成相关,网损 F_2 与EVCP的接入容量和位置都相关。 F_1 和 F_2 越小,经济性越好。由于用户满意度 f_3 没有量纲且越大越好,为了与 F_1 和 F_2 逻辑统一,设置归一化的 $F_3 = 1/f_3$ 。由此得到归一化后的EVCP多目标规划综合最优函数 F 为:

$$\min F = \min(\alpha F_1 + \beta F_2 + \gamma F_3) \quad (6)$$

式中: α, β 和 γ 分别为3个优化目标的调节系数^[21]。

根据投资成本、网损和用户满意度在规划过程中规划者认定的重要性进行取值,且 $\alpha + \beta + \gamma = 1$ 。例

如设置系数 $\gamma=0.6, \alpha=0.2, \beta=0.2$,则表示规划者更看重用户满意度。在规划过程中,通过改变调节系数的取值可以得到目标权重不同的规划方案。

2.2 约束条件

规划目标函数寻优过程中, F_1 和 F_3 的取值边界由EVCP的容量约束确定。 F_2 由大型停车场区域内电网的潮流确定,需要遵守电网潮流计算的约束。

2.2.1 功率平衡约束

停车区域内电网进行潮流计算时,电源功率时刻与负荷相等,则功率平衡约束为:

$$P_s = P_{EV} + P_L \quad (7)$$

式中: P_s 为电源功率; P_{EV} 为EV负荷; P_L 为其他负荷,例如照明、计费等设备负荷。

电网中每个节点的功率约束为:

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{j=1}^{j=n} U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \\ Q_i = U_i \sum_{j=1}^{j=n} U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} + B_{ij} \cos \delta_{ij}) \end{cases} \quad (8)$$

式中: P_i 和 Q_i 为节点为 i 注入电网的有功功率和无功功率; U_i 和 U_j 为节点 i 和节点 j 的电压; G_{ij} 和 B_{ij} 为 i, j 两节点间的线路电导和电纳; δ_{ij} 为 i, j 两节点电压的相角差^[22]。

2.2.2 电压约束

为了确保EV进行充电时不会引起过大的电压波动,电网潮流计算时需要满足的电压约束为^[23]:

$$U_{i \min} \leq U_i \leq U_{i \max} \quad (9)$$

式中: $U_{i \min}$ 和 $U_{i \max}$ 分别为额定电压的最小值和最大值。

根据国家标准,配电网三相供电电压的允许偏差为额定电压的 $\pm 7\%$,本文设置电压波动的上下限为线路额定电压的 $\pm 5\%$,即 $U_{i \min}$ 为额定电压的95%, $U_{i \max}$ 为额定电压的105%。

2.2.3 EVCP的容量约束

为了使EVCP尽可能满足停车区域内EV的充电需求且设备利用率高,避免出现车多桩少或车少桩多的情况^[24],根据EV的充电负荷预测结果给出EVCP的容量约束为:

$$N_{AVG} < N < N_{\max} \quad (10)$$

式中, N_{\max} 为预测得到的EV充电负荷的峰值; N_{AVG} 为预测得到的EV充电负荷在1d内的均值。

容量下限不选择EV充电负荷最小值的原因是EVCP的容量一般应尽可能满足EV用户的需求,如果EVCP过少会降低用户的满意度,进而影响运营收益。容量上限不超过峰值容量的原因是,过多的EVCP并

不会显著增加用户的满意度,但会降低设备的利用率,从而造成资源浪费,降低EVCP规划的经济性。

3 基于改进粒子群算法的优化求解

粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)采用“速度-位移”搜索模型进行寻优^[25],通过适应度值不断迭代更新,在整个空间中搜寻最优粒子。本文设置EVCP的容量以及并网位置为粒子,应用PSO找到使EVCP规划目标函数综合最优且满足约束条件的解。PSO中的粒子拥有2个属性,分别是代表粒子移动快慢的速度向量和代表粒子移动方向的位置向量^[26],并通过式(11)来更新速度和位置。

$$\begin{cases} v_i^{k+1} = v_i^k + c_1 \times \text{rand}^k \times (pbest_i^k - x_i^k) + \\ c_2 \times \text{rand}^k \times (gbest_i^k - x_i^k) \\ x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^k \end{cases} \quad (11)$$

式中: $i=1, 2, \dots, H, H$ 为粒子总数; v_i^k 为第 i 个粒子迭代 k 次的粒子速度; x_i^k 为第 i 个粒子迭代 k 次的粒子位置; rand 为 $[0, 1]$ 之间的随机数; $pbest_i^k$ 为第 i 个粒子迭代 k 次在个体极值点的位置; $gbest_i^k$ 为整个种群迭代 k 次在全局极值点的位置; c_1 和 c_2 分别为每个粒子的个体学习因子和社会学习因子,一般取值 $[0, 4]$; k 为迭代次数。

由于传统PSO在搜索后期收敛速度明显变慢,搜索能力变差,并且当收敛达到一定精度时优化不能继续,很容易陷入局部最优。因此对速度更新公式进行修正,加入惯性权重因子 ω :

$$\begin{aligned} v_i^{k+1} = & \omega \times v_i^k + c_1 \times \text{rand}^k \times (pbest_i^k - x_i^k) + \\ & c_2 \times \text{rand}^k \times (gbest_i^k - x_i^k) \end{aligned} \quad (12)$$

首先给出线性惯性权重递减策略^[27]:

$$\omega = \omega_{\max} - k \times (\omega_{\max} - \omega_{\min}) / k_{\max} \quad (13)$$

式中: k_{\max} 为最大迭代次数; ω_{\max} 和 ω_{\min} 分别为惯性权重因子的上、下限,一般取值为0.8和0.4。

通过修正可以使搜寻初期的粒子速度较快,具有较大的搜寻空间和较快的收敛速度,能够快速定位到最优解的近似位置。随着迭代次数增加,在搜索后期粒子的速度逐渐减小,使其能够在小范围内进行精细的局部搜索^[28]。

采用改进惯性权重的PSO算法开展全局寻优时,需要评估每个个体的优劣程度,适应度函数作为评价指标,适应度越高代表筛选出的个体越接近期望方向。因此在寻优过程中保留适应度高的个体,淘汰适应度低的个体。在评价个体适应度时,

习惯将算法优化方向对应于适应度值增加的方向,所以本文将目标函数的倒数作为适应度函数。因此,选择个体的适应度函数如式(14)所示:

$$f = \frac{1}{F} = \frac{1}{\alpha F_1 + \beta F_2 + \gamma F_3} \quad (14)$$

应用改进 PSO 进行 EVCP 优化规划的求解流程如图 9 所示。图 9 中,电网潮流计算是计算停车区域的电网在某一给定粒子(EVCP 容量和并网位置)情况下的稳态潮流,是目标函数中网损分量的计算依据。

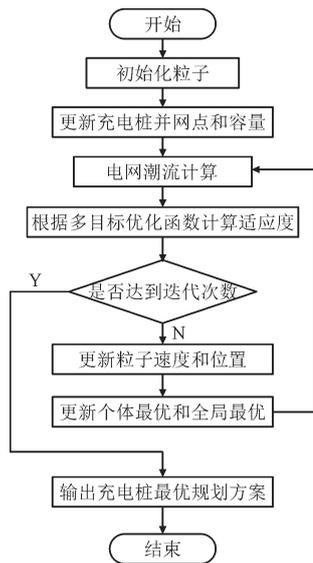


图9 EVCP 规划的改进 PSO 优化求解流程

Fig.9 Improved PSO optimization flowchart for EVCP planning

4 算例验证

4.1 算例数据

为了验证本文所给针对大型停车区域 EVCP 规划算法的有效性,以图 1 所示的某机场远端大型停车区域为算例进行 EVCP 规划。该算例的配电系统电网简化拓扑结构如图 10 所示。

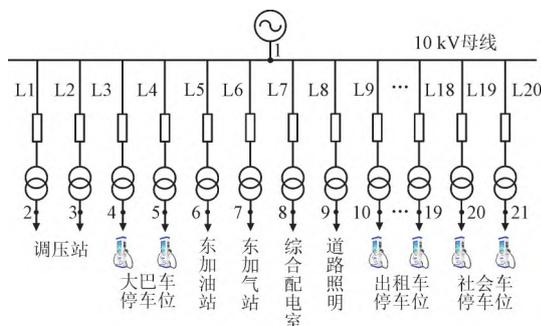


图 10 某机场远端停车场电网简化拓扑

Fig.10 Grid simplify topology of an airport remote

从 10 kV 开闭所共引出 20 条线路,分别接入对应馈线柜,变压器电压为 $10.5 \pm 5\%/0.4$ kV,变比为 25:1。其中大巴车停车位对应支路 L3 和 L4,出租车停车位对应支路 L9 至 L18 共 10 条线路,社会车停车位对应支路 L19 和 L20。电网参数如表 1 和 2 所示。

表 1 机场停车场电网的节点数据

Table 1 Node data for airport parking lot grid

节点	电压幅值/kV	有功功率/MW	无功功率/Mvar
1	10	10.730	2.689
2	0.4	0.251	0.073
3	0.4	0.874	0.216
4	0.4	0.452	0.118
5	0.4	0.467	0.123
6	0.4	0.072	0.019
7	0.4	0.328	0.093
8	0.4	0.727	0.183
9	0.4	0.231	0.067
10	0.4	0.383	0.109
11	0.4	0.391	0.116
12	0.4	0.387	0.091
13	0.4	0.398	0.103
14	0.4	0.388	0.105
15	0.4	0.395	0.110
16	0.4	0.379	0.094
17	0.4	0.390	0.114
18	0.4	0.365	0.096
19	0.4	0.384	0.107
20	0.4	0.703	0.162
21	0.4	0.695	0.158

表 2 机场停车场电网的线路参数

Table 2 Line parameters for airport parking lot grid

支路	首节点	末节点	电缆型号及规格	长度/km
L1	1	2	ZC-YJV22-8.7/15-3×95	0.401
L2	1	3	ZC-YJV22-8.7/15-3×95	0.396
L3	1	4	ZC-YJV22-8.7/15-3×120	0.294
L4	1	5	ZC-YJV22-8.7/15-3×120	0.350
L5	1	6	ZC-YJV22-8.7/15-3×95	0.275
L6	1	7	ZC-YJV22-8.7/15-3×95	0.325
L7	1	8	ZC-YJV22-8.7/15-3×120	0.049
L8	1	9	ZC-YJV22-8.7/15-3×95	0.165
L9	1	10	ZC-YJV22-8.7/15-3×120	0.042
L10	1	11	ZC-YJV22-8.7/15-3×120	0.061
L11	1	12	ZC-YJV22-8.7/15-3×120	0.080
L12	1	13	ZC-YJV22-8.7/15-3×120	0.099
L13	1	14	ZC-YJV22-8.7/15-3×120	0.118
L14	1	15	ZC-YJV22-8.7/15-3×120	0.137
L15	1	16	ZC-YJV22-8.7/15-3×120	0.156
L16	1	17	ZC-YJV22-8.7/15-3×120	0.175
L17	1	18	ZC-YJV22-8.7/15-3×120	0.194
L18	1	19	ZC-YJV22-8.7/15-3×120	0.213
L19	1	20	ZC-YJV22-8.7/15-3×120	0.293
L20	1	21	ZC-YJV22-8.7/15-3×120	0.283

停车场内每日3类EV的停放数据如表3所示。

表3 不同类型EV的停放数据

Table 3 Parking data for different types of EVs 辆

时刻	社会车	出租车	大巴车
2:00	325	270	15
4:00	478	374	26
6:00	649	483	48
8:00	967	638	61
10:00	1129	709	83
12:00	937	872	73
14:00	1030	904	103
16:00	1138	982	82
18:00	1074	1140	94
20:00	863	837	56
22:00	727	623	38
24:00	529	378	21

3类EV的充电意愿统计数据如表4所示。

表4 EV的充电意愿统计数据

Table 4 Charging intentional statistics of EVs

剩余电量/%	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
EV占比/%	7	16	23	14	15	11	7	5	2	0

4.2 结果分析

以停车区域EV的车流量、电池容量、充电意愿的统计数据为基础,结合车辆充电模型,建立EV充电这一随机过程的分布模型,采用MC法进行参数抽样,按概率抽取影响EV充电负荷的特征量,累计所有发生充电行为的EV,模拟得到停车区域1 d 1 440 min内EV的充电负荷曲线如图11示,包括3类不同车型的充电负荷。

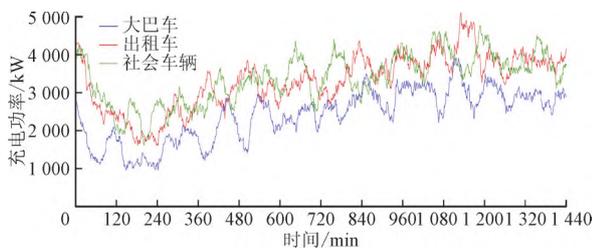


图11 3类EV的充电负荷

Fig.11 Charging load of three types of electric vehicles

根据图11,可以获得1 d当中3类EV的充电负荷峰值及均值,如表5所示。

表5 3类EV充电负荷的容量峰值及均值

Table 5 Peak and average capacity of the three types of EV charging loads kW

车型	充电负荷峰值	充电负荷均值
社会车	4 654	1 753
出租车	5 069	1 933
大巴车	4 876	1 195

EVCP的传统规划方法为车桩比按3:1进行配置。由于停车场的大巴车、出租车和社会车辆的车位数分别为120个、180个和150个,因此分别在3类停车位上安装40个、60个和50个EVCP,单个EVCP的功率为100 kW。应用本文所给的方法对停车区域的EVCP进行优化规划,规划过程中认为网损、投资成本和用户满意度这3个目标同样重要,因此调节系数 α 、 β 和 γ 相等,取值为0.33。2种规划方法的结果对比如表6所示。

表6 2种EVCP规划的结果对比

Table 6 Comparison of EVCP plans results

项目	社会车充电桩配置/kW	出租车充电桩配置/kW	大巴车充电桩配置/kW	网损/kW	成本/万元
传统规划	5 000	6 000	4 000	5.072	425.57
优化规划	4 146.78	4 528.61	3 011.38	3.619	331.57

由表6可以看出优化规划可以有效降低3种车型的EVCP容量,停车场的网损以及EVCP的投资成本。按照单桩100 kW来计算,社会车辆、出租车和大巴车优化后配置的EVCP数量分别为41个、45个和30个。

优化方案中3类车型的充电桩配置个数及接入电网的最佳位置如表7所示。

表7 机场停车场EVCP优化规划结果

Table 7 Planning results of airport parking lots EVCP

车型	支路编号	充电桩配置个数/个	接入电网的位置
大巴车	L3	16	节点4
大巴车	L4	14	节点5
出租车	L9	4	节点10
出租车	L10	5	节点11
出租车	L11	4	节点12
出租车	L12	4	节点13
出租车	L13	6	节点14
出租车	L14	4	节点15
出租车	L15	5	节点16
出租车	L16	4	节点17
出租车	L17	5	节点18
出租车	L18	4	节点19
社会车	L19	21	节点20
社会车	L20	20	节点21

EV充电负荷接入电网后各节点电压偏差如图12所示,节点电压偏差最大值为-3.28%,电网各节点电压均未越限。因此依据本文所给的优化规划方法进行停车区域EVCP配置,当EV充电负荷接入电网不会造成电压大幅度波动。

表6优化规划结果是基于3个调节系数相等的情况。改变调节系数可得到侧重点不同的规划

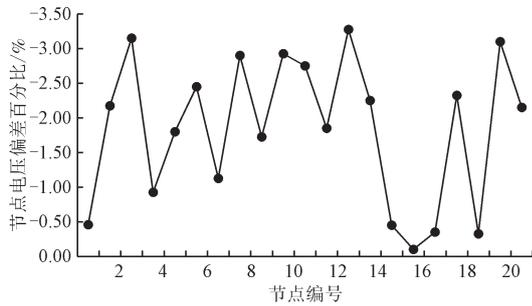


图12 各节点电压偏差

Fig.12 Voltage deviation at each node

方案。(1)方案 1:前文的优化结果基于 3 个调节系数相等的情况;(2)方案 2:如果侧重投资成本,可以设计 3 个调节系数分别为 $\alpha=0.6, \beta=0.2, \gamma=0.2$;(3)方案 3:如果侧重电网网损,可以设计调节系数为 $\alpha=0.2, \beta=0.6, \gamma=0.2$;(4)方案 4:如果重视用户满意度,可以设计调节系数为 $\alpha=0.2, \beta=0.2, \gamma=0.6$ 。表 8 为这 4 种规划方案的投资成本,网损和用户满意度对比,决策者可以根据这些数据,并结合实际情况决定最终采用哪种规划方案。

表 8 改变调节系数得到的多方案对比

Table 8 Comparison of multiple schemes obtained by changing the adjustment factor

方案	投资成本/万元	系统网损/kW	用户满意度
方案 1	331.57	3.619	0.73
方案 2	285.72	3.437	0.58
方案 3	345.04	3.164	0.77
方案 4	361.84	3.270	0.89

多种方案的结果对比表明本文给出的 EVCP 规划方法具有灵活的可调节性,符合实际的工程需求。规划者可以根据实际需求设置调节系数的权重取值,灵活选择规划方案,得到充电桩最优配置容量、并网位置结果。

5 结语

本文针对大型停车区域给出了 EVCP 满足多个目标的规划优化设计方法。该规划方法首先根据停车区域内 EV 的电池类型、各类 EV 的停放规律及 EV 用户的充电意愿等统计数据,预测出区域内 EV 充电负荷的时空分布。然后以 EVCP 的投资成本、电网网损以及 EV 用户的满意度为目标建立 EVCP 规划的多目标优化函数,并应用改进 PSO 在安全约束范围内得到 EVCP 的最优规划。该规划方法相较于传统 EVCP 的规划方法不仅更加经济合理,而且对电网运行的影响较小,对实际工程的 EVCP 规划具有指导作用。

参考文献

- [1] 邢强,陈中,冷钊莹,等.基于实时交通信息的电动汽车路径规划和充电导航策略[J].中国电机工程学报,2020,40(2):534-550. XING Qiang, CHEN Zhong, LENG Zhaoying, et al. Route planning and charging navigation strategy for electric vehicles based on real-time traffic information[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(2): 534-550.
- [2] 徐青山,蔡婷婷,刘瑜俊,等.考虑驾驶人行为习惯及出行链的电动汽车充电站址规划[J].电力系统自动化,2016,40(4):59-65,77. XU Qingshan, CAI Tingting, LIU Yujun, et al. Location planning of charging stations for electric vehicles based on drivers behaviours and travel chain[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(4):59-65, 77.
- [3] 张洪财,胡泽春,宋永华,等.考虑时空分布的电动汽车充电负荷预测方法[J].电力系统自动化,2014,38(1):13-20. ZHANG Hongcai, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Estimation method of electric vehicle charging load considering temporal and spatial distribution[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(1):13-20.
- [4] 邵尹池,穆云飞,余晓丹,等.“车-路-网”模式下电动汽车充电负荷时空预测及其对配电网潮流的影响[J].中国电机工程学报,2017,37(18):5207-5219,5519. SHAO Yinchu, MU Yunfei, YU Xiaodan, et al. A spatial-temporal charging load forecast and impact analysis method for distribution network using EVs-traffic-distribution model[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(18):5207-5219, 5519.
- [5] 李含玉,杜兆斌,陈丽丹,等.基于出行模拟的电动汽车充电负荷预测模型及V2G评估[J].电力系统自动化,2019,43(21):88-96. LI Hanyu, DU Zhaobin, CHEN Lidian, et al. The research of spatial-temporal charging load forecast modeling and V2G evaluation method of electric vehicles considering traffic network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(21):88-96.
- [6] LEOU R C, SU C L, TENG J H. Modelling and verifying the load behaviour of electric vehicle charging stations based on field measurements[J]. Generation Transmission & Distribution IET, 2015, 9(11): 1112-1119.
- [7] ZHU J, YANG Z, GUO Y, et al. Short-term load forecasting for electric vehicle charging stations based on deep learning approaches[J]. Applied Sciences, 2019, 9(9): 1723.
- [8] 周椿奇,向月,童话,等.轨迹数据驱动的电动汽车充电需求及V2G可控容量估计[J].电力系统自动化,2022,46(12):46-55. ZHOU Chunqi, XIANG Yue, TONG Hua, et al. Trajectory-data-driven estimation of electric vehicle charging demand and vehicle-to-grid regulable capacity[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(12):46-55.
- [9] 严干贵,刘华南,韩凝晖.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.
- [10] 李科,皇甫霄文,李梦超,等.光-储一体电动汽车充电站储能规

- 划[J].电力系统及其自动化学报,2023,35(8):82-93.
- LI Ke, HUANGFU Xiaowen, LI Mengchao, et al. Energy storage planning for integrated PV-energy storage electric vehicle charging station[J].Proceedings of the CSU-EPSA,2023,35(8): 82-93.
- [11] YI T, CHENG X B , ZHENG H, et al. Research on location and capacity optimization method for electric vehicle charging stations considering user's comprehensive satisfaction[J]. Energies, 2019, 12(10): 1915.
- [12] 姚明,毛文杰,曹淑超,等.基于多源数据的电动汽车充电设施布局优化方法研究[J].智慧电力,2023,51(9):31-37.
- YAO Ming, MAO Wenjie, CAO Shuchao, et al. Optimization method of electric vehicle charging facility layout based on multi-source data[J]. Smart Power, 2023, 51(9):31-37.
- [13] ZHANG X, XU Y, LU S, et al. Joint planning of distributed pv stations and EV charging stations in the distribution systems based on chance-constrained programming[J]. IEEE Access , 2021 , 9: 6756-6768.
- [14] 李宏刚,潘景宜.铁路综合交通枢纽电动汽车充电桩系统设计[J].电力系统保护与控制,2019,47(19): 152-157.
- LI Honggang, PAN Jingyi. System design of charging pile system for electric vehicle in railway comprehensive communication hub [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(19): 152-157.
- [15] 姚志力,江斌开,龚春阳,等.计及电动汽车充电负荷特性的区域多能源站规划设计[J].电网技术,2022,46(9):3304-3318.
- YAO Zhili, JIANG Binkai, GONG Chunyang, et al. Planning and design of regional multi-energy stations taking into account electric vehicle charging load characteristics[J]. Power System Technology , 2022, 46(9):3304-3318.
- [16] 柳丹,康逸群,熊平.计及经济性和光伏消纳率的微电网多目标优化策略研究[J].电力需求侧管理,2023,25(2):70-75.
- LIU Dan, KANG Yiqun, XIONG Ping. Research on multi-objective optimization strategy of microgrid taking into account economy and photovoltaic consumption rate[J]. Power Demand Side Management, 2023, 25(2):70-75.
- [17] 尚龙龙,程俊杰,王伟,等.计及交通拥堵的电动汽车充电站规划方法[J].电力科学与技术学报,2023,38(1):66-76.
- SHANG Longlong, CHENG Junjie, WANG Wei, et al. An electric vehicle charging station planning method taking traffic congestion into account[J]. Journal of Electric Power Science and Technology , 2023, 38(1):66-76.
- [18] ZHAO Z, XU M, LEE C K M. Capacity planning for an electric vehicle charging station considering fuzzy quality of service and multiple charging options[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology , 2021, 70(12):12529-12541.
- [19] 苏向敬,张传坤,符杨,等.考虑多场景运行的不平衡主动配网电池储能系统两阶段优化配置[J].电力系统保护与控制,2023,51(10):88-97.
- SU Xiangjing, ZHANG Chuankun, FU Yang, et al. Two-stage optimal configuration of unbalanced active distribution battery energy storage system considering multi-scenario operation[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(10):88-97.
- [20] 杨寒雨,赵晓永,王磊.数据归一化方法综述[J].计算机工程与应用,2023,59(3):13-22.
- YANG Hanyu, ZHAO Xiaoyong, WANG Lei. A review of data normalization methods[J]. Computer Engineering and Applications , 2023, 59(3):13-22.
- [21] 佟曦,侯朗博,孙昊,等.高比例光伏和电动汽车接入配电网的无功优化[J].智慧电力,2023,51(10): 31-37,102.
- TONG Xi, HOU Langbo, SUN Hao, et al. Reactive power optimization for high percentage of photovoltaic and electric vehicles connected to the distribution network[J]. Smart Power, 2023, 51(10):31-37, 102.
- [22] 惠慧,李蕊,朱逸楠,等.含高比例分布式光伏的配电网多目标概率规划方法[J].电测与仪表,2023,60(11):2-10.
- HUI Hui, LI Rui, ZHU Yidi, et al. Multi-objective probabilistic planning method for distribution networks containing a high percentage of distributed photovoltaics[J]. Electrical Measurement and Instrumentation , 2023, 60(11):2-10.
- [23] 沙广林,刘璐,马春艳,等.考虑车网互动的电动汽车有序充电策略[J].供用电,2023,40(10):46-54.
- SHA Guanglin, LIU Lu, MA Chunyan, et al. An orderly charging strategy for electric vehicles considering vehicle-network interaction [J]. Distribution & Utilization , 2023, 40(10):46-54.
- [24] 石立国,李延真,关雪琳,等.电动汽车充电桩与分布式电源多阶段协同规划方法[J].供用电,2022,39(5):33-40,53.
- SHI Liguang, LI Yanzhen , GUAN Xuelin , et al. Multi-stage collaborative planning method for electric vehicle charging pile and distributed power supply[J].Distribution & Utilization, 2022, 39(5): 33-40, 53.
- [25] 张美霞,叶睿琦,杨秀,等.基于多维状态空间MCMC充电负荷预测的充电站规划[J].电力科学与技术学报,2022,37(4):78-87.
- ZHANG Meixia, YE Ruiqi, YANG Xiu, et al. Charging station planning based on multidimensional state space MCMC charging load prediction[J].Journal of Electric Power Science and Technology , 2022, 37(4):78-87.
- [26] MUTHUKANNAN S, KARTHIKAIKANNAN D. Multiobjective planning strategy for the placement of electric-vehicle charging stations using hybrid optimization algorithm[J]. IEEE Access , 2022, 10: 48088-48101.
- [27] 侯慧,唐俊一,王逸凡,等.城区电动汽车充电站布局规划研究[J].电力系统保护与控制,2022,50(14):181-187.
- HOU Hui, TANG Junyi, WANG Yifan, et al. Research on electric vehicle charging station layout planning in urban areas[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(14):181-187.
- [28] 刘廷章,张子恒.基于循环迭代粒子群算法对电动汽车无线充电系统的联合参数在线辨识[J].电工技术学报,2022,37(18):4548-4564.
- LIU Tingzhang, ZHANG Ziheng. Online identification of joint parameters of electric vehicle wireless charging system based on cyclic iterative particle swarm algorithm[J].Journal of Electrotechnology , 2022, 37(18):4548-4564.

(责任编辑 张健)

收稿日期:2024-05-28; 修改日期:2024-06-28

作者简介:任哲(1983),男,陕西西安人,硕士,高级工程师,研究方向为变电一次及配电网。

张晓滨(1977),男,通信作者,山西离石人,博士,副教授,研究方向为智能电网的优化控制和新能源并网控制。