

共享电动汽车混合充换电站选址优化

栗然,臧向迪,张文昕,罗东晖,李鹏程

(华北电力大学 电气与电子工程学院,河北 保定 071000)

摘要:在未来城市中更换电池这种便捷、高效的方式将成为共享电动汽车补充电能的主要方式。为了建立效率高、成本低、电网友好型的混合充换电站,首先根据共享电动汽车的租赁规律以及功率、时间等充电数据,利用蒙特卡洛模拟方法预测共享电动汽车的充电负荷;然后,以共享电动汽车充换电站对用户捕获程度最大、配电系统网络损耗最小和配电系统电压偏移最小为目标,建立共享电动汽车混合充换电站最优规划的多目标模型;最后,采用改进带精英策略的非支配排序遗传算法(NSGA-II)对多目标模型进行求解,得到Pareto最优解集。以25节点交通网络和IEEE 33节点配电系统为例,验证了所建模型的可行性,可为共享电动汽车混合充换电站的建设提供可行性经验。

关键词:共享电动汽车;混合充换电站;多目标优化;NSGA-II;Pareto最优解

中图分类号:U 469.72

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202110022

0 引言

根据雄安新区的城市规划,未来城市中将会禁止燃油汽车行驶,电动汽车(EV)行业将会迎来飞速发展。EV的推广应用能够有效缓解环境污染和燃油短缺问题。为了应对气候变化问题,进一步实施可持续发展战略,我国提出了“二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和”等目标承诺^[1-2]。可见,未来城市的发展会更加注重能源消耗、尾气排放、道路畅通等问题的解决措施。根据数据统计,私家车的日使用率不足15%,且使用时间短,一天中85%以上的时间处于闲置状态,将“共享经济”与“协同消费”应用于汽车领域被当今社会迫切需要。共享EV的快速发展引发学者们对未来城市背景下共享EV充换电站的建设问题进行研究探究。

不同于传统EV充换电站的选址问题,共享EV的发展年限较短,缺乏统计数据,且关于其充换电站选址的研究鲜有报道。在EV充电负荷预测方面,一些文献以美国国家公路交通安全管理局(NHTS)公布的美国家用车辆调查结果数据为依据,对共享EV的出行规律进行研究,利用蒙特卡洛模拟方法抽取每一辆汽车的交通行为和充电行为,从而得到EV的充电负荷^[3-4]。文献[5]利用马尔可夫和速度-流量模型对EV进行时空负荷预测,在此基础上构建了含EV充换储一体站规划的交直流配电网模型。在充电站选址方面,文献[6]采用基于订单偏好的加权聚合产品评估技术(WASPAS)选取共享EV的最佳建设位置,更好地解决与描述了隶属度与非隶属度函数的不确定性。部分国外学者考虑共享EV的二氧化碳排放量限制,同时考虑环境的影响对充电站进

行了选址优化^[7-8]。此外,有部分学者将配电系统和交通网络节点相耦合,以充电站点俘获的交通流量最大、配电系统网络损耗最小为目标进行EV优化选址^[9-10]。

综上所述,相关方面的研究主要存在如下局限性:①没有考虑规划区域的交通节点情况,导致规划方案的实用性不强;②未考虑电动私家车电池型号的不统一,实际情况下不能实现规模化的换电操作,导致针对传统电动私家车换电模式的研究缺乏实用性。基于已有相关研究内容,本文对共享EV的充电与出行随机特性进行分析,采用蒙特卡洛模拟方法预测共享EV的充电负荷,并将其与电动私家车的充电负荷进行对比。从建站容量方面对混合充换电站与传统充电站进行对比。借鉴分布式电源的思想,结合EV充电站的布局规划、电力设施规划和交通服务设施规划三方面,建立用户捕获程度最大、配电系统节点电压偏移最小、配电系统网络损耗最小的多目标规划模型。采用改进带精英策略的非支配排序遗传算法(NSGA-II)对所建模型进行求解,得到优化建设方案。最后,以25节点交通网络和IEEE 33节点配电系统为例,验证本文模型和方法的可行性。

1 共享EV特性分析

1.1 共享EV运行特性分析

电动私家车与共享EV的区别在于:电动私家车的电池型号不统一,大规模地将换电方式应用于电动私家车能量补充这一愿景实施较困难;相比于传统电动私家车,共享EV具有电池型号较为统一、车辆与储能电池易于分离、车辆受统一管理调控等特点,更适合采用换电方式进行能量补充^[11-12]。

当仅考虑充电模式时,共享EV与传统电动私家车有如下区别:共享EV具有商业性质,在白天时选

择快充,在夜间用户较少时选择慢充;据统计,私家车一天中85%以上的时间处于闲置状态,故电动车用户大多选择在车辆闲置状态进行慢充,在特殊紧急情况下选择快充。

当考虑换电模式时,共享EV在充换电模式下具有如下运行特性:①共享EV的电池型号较为统一,更容易实现采用充换电方式获得电能;②EV受运营商统一管理,充换电规则更灵活;③共享EV的商业性质与私人性质共存。

未来城市共享EV运营商不仅负责车辆的调度,还负责EV充换电管理,同时兼具与电网进行能量交互的功能。共享EV的运营架构如图1所示。

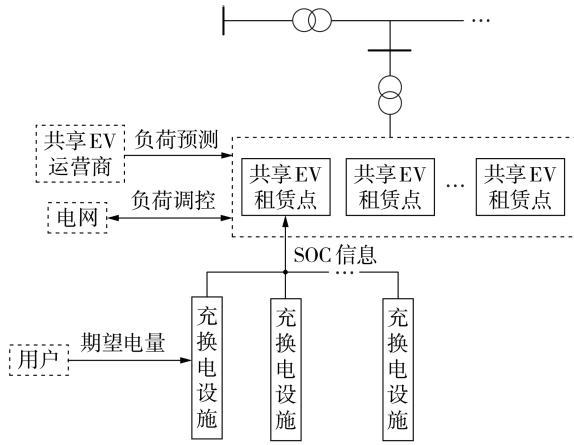


图1 共享EV运营架构

Fig.1 Operation architecture of shared EVs

1.2 共享EV随机特性分析

1) 共享EV的首次出行时刻。

将用户从EV租赁点租赁车辆并行驶视为共享EV的一次出行。根据文献[13]对2017年NHTS公布的数据拟合结果,共享EV的首次出行时刻 t_s 服从多维正态分布,概率密度函数 $f(t_s)$ 可表示为:

$$f(t_s) = \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{t_s \sigma_m \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(t_s - \mu_m)^2}{2\sigma_m^2} \right] \quad (1)$$

式中: a_i 为第 i 维标准正态分布在多维正态分布中所占的比例; n 为多维正态分布的维数; σ_m 、 μ_m 分别为共享EV首次出行时刻的标准差、均值。

2) 共享EV的日行驶时长。

共享EV的日行驶时长 t_c 可通过对用户出行起点、终点进行拟合得到,服从对数正态分布,概率密度函数 $f(t_c)$ 可表示为:

$$f(t_c) = \frac{1}{t_c \sigma_c \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\ln t_c - \mu_c)^2}{2\sigma_c^2} \right] \quad (2)$$

式中: σ_c 、 μ_c 分别为日行驶时的标准差、均值。

3) 共享EV的日行驶里程。

大多共享EV用户选择在城市内出行,其行驶速度可视为匀速,则共享EV的日行驶里程 d_m 可表

示为:

$$d_m = v(t_c) t_c \quad (3)$$

式中: $v(t_c)$ 为共享EV的平均行驶速度。

4) 共享EV的起始充电时刻。

由于共享EV与电动出租车都具有商业性质,其起始充电时刻大致相同。共享EV采用充电方式进行电能补充时的起始充电时刻 t_1 近似服从正态分布,概率密度函数 $f(t_1)$ 可表示为:

$$f(t_1) = \begin{cases} \frac{1}{t_1 \sigma_1 \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(t_1 + 24 - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2} \right] & 0 < t_1 \leq \mu_1 - 12 \\ \frac{1}{t_1 \sigma_1 \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(t_1 - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2} \right] & \mu_1 - 12 < t_1 \leq 24 \end{cases} \quad (4)$$

式中: σ_1 、 μ_1 分别为共享EV起始充电时刻的标准差、均值。

5) 共享EV充换电起始荷电状态(SOC)与充电时长。

考虑到共享EV“即停即充”会对电网电能质量和电池寿命造成不良的影响,故共享EV的充电行为将由运营商统一调控。一般当电池SOC不高于30%时,将对EV进行充换电操作。假设共享EV满足充换电要求时的SOC的概率密度函数 $f(S_0)$ 为:

$$f(S_0) = \frac{1}{S_0 \sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(S_0 - \mu_s)^2}{2\sigma_s^2} \right] \quad (5)$$

式中: S_0 为共享EV的充换电起始SOC,取值范围为0~30%; σ_s 、 μ_s 分别为充换电起始SOC的标准差和均值。

共享EV采用充电方式获取电能时,其充电时长 t_e 可表示为:

$$t_e = \frac{(S_i^c - S_0) E_c}{\eta P_c} \times 60 \quad (6)$$

式中: S_i^c 为共享EV充电结束时的SOC,满足 $S_0 \leq S_i^c \leq S_{\max}$, $S_{\max}$ 为电池能达到的最大SOC,取值为95%; E_c 为EV电池容量; η 为EV的充电效率; P_c 为EV的充电功率。

2 共享EV充电负荷预测

在本文研究中认为共享EV“即停即充”为无序充电模式;共享EV在换电模式下运行时可以受运营商统一调控,故认为共享EV有换电行为时为有序充电模式。

设置某一共享EV调度中心有500辆EV,型号以目前共享EV使用最广泛的“北汽E150EV”为例,参数设置如下:EV电池容量 $E_c=25 \text{ kW} \cdot \text{h}$,每千米耗电量 $Q_c=0.16 \text{ kW} \cdot \text{h} / \text{km}$,慢充功率为7 kW,快充功率为60 kW,充电效率为90%;充换电起始SOC服从

正态分布 $N(0.3, 0.05^2)$; 首次出行时刻服从多维正态分布 $N(9.2, 2.75^2)$, 且第 i 维标准正态分布在多维正态分布中所占的比例 $\alpha_i = 66\%$; EV 日行驶时长服从正态分布 $N(4.8, 1.13^2)$ 。考虑共享 EV 采取无序充电模式, 相关参数如附录 A 表 A1 所示。

考虑前文所述共享 EV 的随机特性, 本文采用蒙特卡洛模拟方法求解共享 EV 在无序充电模式下的充电负荷, 并与传统电动私家车的无序充电负荷进行对比^[14]。无序充电模式下 EV 充电负荷的预测流程图如附录 A 图 A1 所示, 所得结果如图 2 所示。

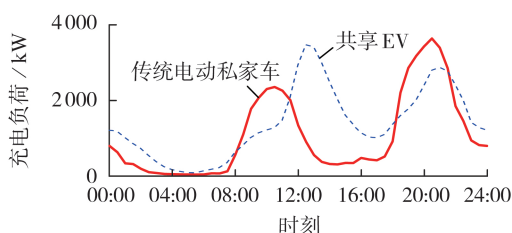


图2 无序充电模式下共享EV与传统电动私家车的充电负荷

Fig.2 Charging load of shared EVs and traditional electric private vehicles under disordered charging mode

由图2可以看出, 无序充电模式下共享EV和传统电动私家车在一天内的充电负荷存在较大的峰谷差, 不同之处在于充电峰谷负荷出现的时段存在差异。传统电动私家车的充电负荷大约从18:00时刻开始快速增加, 并在21:00左右达到峰值, 这是因为大部分用户下班回家后采用慢充方式将车辆接入电网进行充电; 传统电动私家车的充电负荷在10:00左右出现了一个小高峰, 这是因为此时用户大多到达工作或娱乐目的地, 将车辆接入电网进行充电。共享EV的充电负荷从10:00左右开始快速增加, 并在13:00时刻达到高峰, 这是因为相较于电动私家车, 共享EV的日出行次数与行驶里程更多, 相应的充电次数也会增加, 且在白天时采用快充方式充电, 所以达到负荷高峰的时间点出现在白天; 共享EV的负荷小高峰出现在21:00左右, 此时共享EV用户较少, 大部分车辆在运营商的统一调控下选择慢充方式进行能量补充。

将不考虑换电模式的共享EV无序充电负荷与某地区的日负荷曲线进行叠加, 所得结果如图3所示。由图3可以看出, 原始日负荷曲线的峰值与共享EV无序充电负荷峰值基本重合, 造成了“峰峰叠加”的问题。随着共享EV数量的进一步增加, 叠加效果会越来越明显, 所造成的负荷峰谷差也会越来越大。

设置某一充电站点建设了60个7kW慢充电桩, 为500辆共享EV提供充电服务, 并对在负荷峰值时段有充电需求的EV采用换电模式进行能量补充, 将替换的待充电电池的充电负荷转移至负荷低

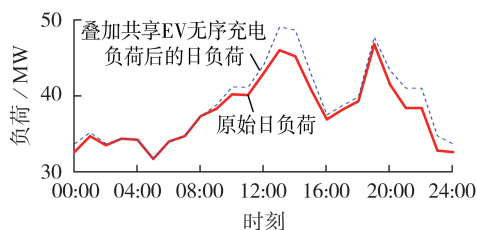


图3 叠加共享EV无序充电负荷后的日负荷曲线

Fig.3 Daily load curve with disordered charging load of shared EVs

谷时段进行充电。规定待充电电池在00:00—09:00时段接入电网, 且接入电网的时刻服从均匀分布。利用蒙特卡洛模拟方法模拟共享EV的有序充电负荷, 结果如图4所示。

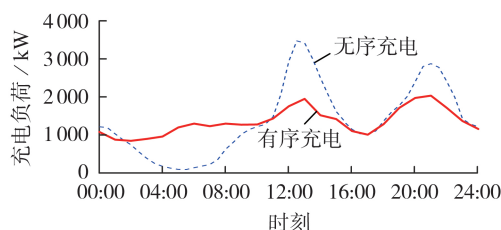


图4 共享EV有序、无序充电负荷曲线

Fig.4 Ordered and disordered charging load curves of shared EVs

对比图4中共享EV的有序、无序充电负荷曲线可知: 在无序充电模式下, 共享EV的充电负荷峰值为3437kW; 在有序充电模式下, 充电负荷峰值为2033kW。可见, 当为相同数量的EV提供服务时, 共享EV混合充换电站的建站容量要远小于传统充电站。此外, 在无序、有序充电模式下共享EV的充电负荷谷值分别为93.19、871.7kW, 有序充电模式将部分峰时段负荷转移到用电价格更低的谷时段, 可见混合充换电站的建设使得对EV充电负荷进行“削峰填谷”成为可能, 且全面考虑了电网和运营商的需求与利益。

将调整后的共享EV有序充电负荷叠加至某地区的日负荷充电曲线上, 并与叠加无序充电负荷后的日负荷曲线进行对比, 结果如图5所示。由图可知, 共享EV无序充电模式下的日负荷曲线的峰谷差

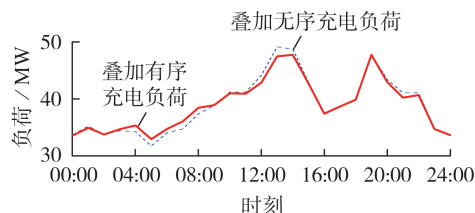


图5 叠加有序、无序充电负荷后的日负荷曲线

Fig.5 Daily load curves with ordered and disordered charging load

为17370 kW,有序充电模式下的日负荷曲线的峰谷差为14720 kW,这进一步说明了共享EV混合充换电站的建设能够对电网负荷实现“削峰填谷”,平抑负荷波动。随着共享EV保有量的增加,可调控的电池数量随之增加,这一效果也将更加明显。

3 共享EV混合充换电站的优化模型设计

综上可知,建设共享EV混合充换电站对电网和运营商而言均是有益的。考虑到站点具有应急服务设施的商业性质,站点还需最大限度地满足用户的需求。本节将城市道路网简化为交通网络节点,并与供电网络节点相耦合,这样在节点规划建设混合充换电站时既可以同时兼顾对供电网络和交通网络的影响,又能保证对用户的最大捕获程度,尽可能地满足用户的需求。

3.1 对用户捕获程度的分析

共享EV作为一种新型出行方式,其主要目的是方便用户,实现资源共享,故在建立共享EV混合充换电站时要充分考虑用户使用车辆的便捷性。为了便于研究,本文将城市简化为 N 个节点,考虑共享EV在2个节点之间的使用情况,而忽略节点内部的使用情况。令 W 为交通道路节点的权重,权重值越大,表示在这2个节点间的人流量越大,即可能使用共享EV的用户越多。在使用共享EV时,假设用户的行驶路程为起点与目的地两节点间的最短距离,并采用Dijkstra最短路径算法求解两节点之间的最短路径。

以附录A图A2所示的交通路网为例,用户从交通道路节点1行驶至交通道路节点4,用户捕获程度为 $W_1W_4L_{1-3-4}$,其中 W_1 为交通道路节点1的权重,取值为0.6; W_4 为交通道路节点4的权重,取值为0.6; L_{1-3-4} 为交通道路节点1至交通道路节点4的最短距离,取值为150 km。

3.2 优化模型的目标函数

3.2.1 用户捕获程度最大

假设用户以共享EV租赁点为起点,从起点出发到目的地的行驶路径为两节点间的最短路径。为了保证尽可能多的用户使用共享EV出行,要综合考虑使混合充换电站所在位置的交通路网节点的权重最大,用户租赁共享EV后能够行驶的路程最长且可达到的节点最多,即目标函数可表示为:

$$\max f_1 = f_{11} + f_{12} \quad (7)$$

$$f_{11} = W_o W_d K_o K_d L_{od} \quad (8)$$

$$f_{12} = W_o W_d K_o (1 - K_d) L_{od} \quad (9)$$

式中: f_1 为共享EV的用户捕获程度; f_{11} 为目的建设充换电站时的用户捕获程度; f_{12} 为目的不建设充换电站时的用户捕获程度; W_o 、 W_d 分别为起点、目的地的节点权重; K_o 、 K_d 分别为起点、目的地是否建

设充换电站的标志变量,若建设则取值为1,若不建设则取值0; L_{od} 为起点到目的地的最短距离。假如共享EV的单次最大行驶距离为200 km,若目的地建设充换电站,则 L_{od} 的最大值为单次最大行驶距离200 km;若目的地不建设充换电站,则 L_{od} 的最大值为单次最大行驶距离的一半,即100 km。

3.2.2 配电系统网络损耗最小

EV充电负荷接入电网势必会对配电系统产生影响,改变配电系统的潮流,产生网络损耗,从而影响电网和运营商的利益。网络损耗除了与电网内已有的负荷有关外,还与充换电站的位置和容量有关^[15]。本文以配电系统网络损耗最小为目标进行混合充换电站设计,即:

$$\min f_2 = P_{\text{loss}}(K_i, P_{Si}, Q_{Si}) \quad (10)$$

式中: P_{loss} 为配电网的网络损耗; K_i 表示节点 i 是否建设充换电站, $K_i=1$ 表示在节点 i 建设充换电站, $K_i=0$ 表示在节点 i 不建设充换电站; P_{Si} 、 Q_{Si} 分别为节点 i 建设充换电站时的有功、无功容量。

3.2.3 节点电压偏移最小

EV属于非线性负荷,接入电网进行充电不仅会对配电系统造成功率损耗,还会使各节点电压发生偏移。引入电压偏移的概念来量化节点电压的标准,以节点电压偏移最小为目标可表示为:

$$\min f_3 = \sum_{i=2}^N \gamma_i \frac{|V_i - V_o|}{V_o} \quad (11)$$

$$\gamma_i = \frac{P_i}{P_{\text{sum}}} \quad (12)$$

式中: N 为配电网的节点数量(经简化,本文中的交通路网节点与配电网节点相耦合,即交通路网节点数量与配电网节点数量相等,且默认节点1为平衡节点); V_i 为节点 i 的电压; V_o 为节点的额定电压; γ_i 为电网节点 i 在整个配电网中所占的权重(重要程度); P_i 为节点 i 的有功功率; P_{sum} 为配电网的有功功率之和。由式(12)可见,电网节点 i 的权重越大,表明该电网节点在配电网中越重要,则 γ_i 的取值越大。

3.3 优化模型的约束条件

3.3.1 混合充换电站数量约束

为了满足城市中用户的需求并保证运营商的利益,目前在建设共享EV能量补充站点时倾向于设置尽可能多的充换电站。从电网的角度而言,大量设置共享EV混合充换电站会对电能质量产生很大的影响。此外,建立共享EV混合充换电站需要占用大量的城市土地资源。故有必要限制共享EV混合充换电站的建设数量,如式(13)所示。

$$\sum_{i=1}^N K_i = M \quad (13)$$

式中: M 为在该区域规划建设共享EV充换电站的总

数量。

3.3.2 EV 行驶里程约束

EV 充满电后在没有电能补充的情况下能行驶的距离是有限的。如果目的地没有建设充换电站,则用户行驶至目的地的过程中消耗的电能最多为电池总电量的一半(即只能行驶最大行驶里程的一半距离),这样才能保证用户有足够的电量返回起点进行还车或者进行电能补充。则 EV 行驶里程约束可表示为:

$$\begin{cases} L_{od} \leq X & K_d = 1 \\ L_{od} \leq X/2 & K_d = 0 \end{cases} \quad (14)$$

式中: X 为 EV 满电时的最大行驶里程。

3.3.3 混合充换电站容量约束

资源利用的重叠性可以降低站点的建设投资,从而减小建设容量。混合充换电站容量约束为:

$$P_{Si} = P_{set} \quad (15)$$

式中: P_{set} 为运营商设定的充换电站建设有功容量。

3.3.4 功率平衡约束

配电网中各线路节点之间需要保持功率平衡约束,如式(16)所示。

$$P_{SUB} = P_{loss} + \sum_{i=2}^N P_{Di} + \sum_{i=2}^N K_i P_{Si} \quad (16)$$

式中: P_{SUB} 为平衡节点的有功注入功率; P_{Di} 为节点 i 的原始有功负荷。

3.3.5 系统潮流约束

配电网在负荷发生变化时需要满足如下潮流约束:

$$\begin{cases} -P_{Di} - K_i P_{Si} = V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ -Q_{Di} - K_i Q_{Si} = V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (17)$$

式中: G_{ij} 和 B_{ij} 分别为节点导纳矩阵元素的实部和虚部; θ_{ij} 为支路 ij 的电压相角; Q_{Di} 为节点 i 的原始无功负荷。

联立式(7)一(17),可以得到共享 EV 混合充换电站 in 交通网络和配电网不同机制作用下的最优规划模型。

4 求解算法

4.1 NSGA-II 介绍

NSGA-II 是目前比较流行的求解多目标优化模型的算法之一。相较于传统的遗传算法,NSGA-II 引入了精英策略并采用分层存放策略,能更好地保留父代种群中的优良个体^[16]。

4.1.1 染色体编码

NSGA-II 中的染色体编码与传统的遗传算法相同。本文将染色体长度定义为交通网络的节点数量 N ,若某一交通网络节点建设了混合充换电站,则对

应的染色体编码为 1;否则,对应的染色体编码为 0。一种染色体编码方案如附录 A 图 A3 所示。

4.1.2 种群初始化

为了保证能量补充站点的建设数量为定值,先随机选择某些节点,将选取节点对应位置处的染色体编码置 1,其余置 0。

4.1.3 种群交叉、变异

对于本文模型而言,交叉时需要保证编码为 1 的染色体数量为定值 M ,交叉后新个体中编码为 1 的染色体数量为 H 。若 $H > M$,则将 $H-M$ 个染色体编码置 0;若 $H < M$,则将 $M-H$ 个染色体编码置 1。对于变异的种群,若变异后编码为 1 的染色体数量为 H ,小于定值 M ,则需要随机选择 $M-H$ 个编码为 0 的染色体,将其编码置 1;若 $H > M$,则需要随机选择 $H-M$ 个编码为 1 的染色体,将其编码置 0。

4.2 求解步骤

1)利用 Dijkstra 最短路径算法求解各交通网络节点至其余各节点的最短距离 L_{ij} 。

2)初始化种群。

3)进行非支配排序并计算拥挤度。对生成的种群进行非支配排序,将种群中所有个体进行分级^[17]。此外,引入拥挤度的概念,如附录 A 图 A4 所示。

4)选择、交叉、变异。

5)种群合并。

6)对新生成的种群进行非支配排序并计算拥挤度^[18]。

7)利用精英策略,将优良的个体保存到下一代,生成大小为 N 的种群。

8)重复上述步骤,直至达到最大迭代次数。

5 算例分析

5.1 算例介绍

本文以 25 节点交通网络与 IEEE 33 节点配电系统^[19]为例,对本文所提规划模型和算法的有效性进行验证,拓扑结构分别如附录 B 图 B1 和图 B2 所示。经简化后,交通网络节点 1—25 与配电系统节点 1—25 相耦合,但并非地理位置上的完全耦合。

根据目前 EV 电池的续航能力进行改进,设置电池充满电时 EV 的续航里程为 200 km,每个站点服务 EV 数量为 500 辆,设置传统充电站和充换电站的容量分别为 1.2、0.4 MW,充换电站数量为 6 座。25 节点交通网络中各节点的权重如附录 B 表 B1 所示。

5.2 仿真结果

按照 NSGA-II 的求解步骤,设置个体维度为 25,种群数量为 200,最大迭代次数为 500,交叉概率为 0.9,变异概率为 0.1。由于所设计的程序针对目标函数的最小值进行分析求解,将 $\max f_i$ 变换为 $\min(-f_i)$,求得 3 个目标函数的最小值。

在利用NSGA-II求解算例时,将每一个节点的建站选址方案当作一个个体,将每个节点是否建站的标志变量放入各个体的染色体序列中,前25位表示25个节点是否建站,每一位代表一个节点,取1表示在该节点处建站,取0表示不建站;第26—28位表示该选址方案对应的3个目标函数值,第29、30位分别表示非支配解的等级和拥挤度。在MATLAB中利用NSGA-II求解传统充电站与混合充换电站的建设方案,得到最优解集空间的Pareto最优前沿,如图6所示(图中 f_3 为标么值)。

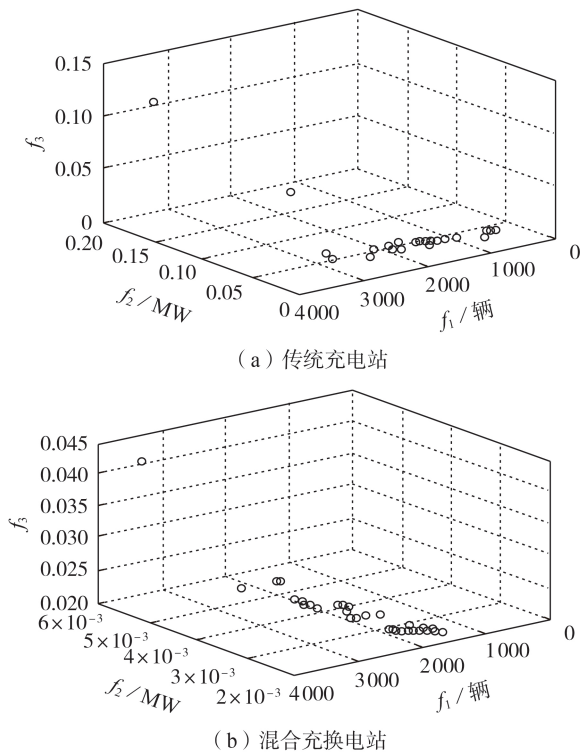


图6 最优解集空间的Pareto最优前沿

Fig.6 Pareto optimal front of optimal solution set space

由图6可知:当用户捕获程度小于1000辆时,传统充电站的建站选址方案数量远多于混合充电站的建站选址方案数量;且经过数据处理后可知,传统充电站建站选址方案中用户捕获程度的平均值为1738辆,而混合充换电站建站选址方案中用户捕获程度的平均值为1983辆。可见,混合充换电站对用户的捕获程度更高,更能够满足用户的能量补充需求。

由于得到的Pareto非劣解集的数量较多,选取几组具有代表性的数据对共享EV混合充换电站的优化效果进行对比分析,如表1所示(f_3 为标么值)。表中,传统充电站和混合充换电站的建站选址方案均按照用户捕获程度从小到大进行编号排序,且编号相同的传统充电站和混合充换电站的建站选址方案具有同等的用户捕获水平。

表1 建站选址方案的部分Pareto最优解集

Table 1 Partial Pareto optimal solution set of site selection scheme

充电站	方案	建设节点	f_1 / 辆	f_2 / MW	f_3
传统充电站	1	3, 5, 14—16, 21	1568	0.00396	0.03171
	2	3, 6, 12, 17, 19, 23	1742	0.00466	0.03672
	3	1, 2, 13, 17, 18, 24	1934	0.00515	0.03932
	4	3, 6, 17, 19, 21, 24	2089	0.00473	0.03713
	5	6, 11, 17, 18, 21, 24	2114	0.00753	0.04142
	6	1, 8, 14, 17, 18, 24	3941	0.15225	0.13024
混合充换电站	1	1, 3, 6, 19, 20, 23	1542	0.00212	0.02042
	2	2, 5, 12, 17, 19, 20	1770	0.00225	0.02182
	3	2, 7, 16, 19, 21, 23	1943	0.00217	0.02504
	4	3, 8, 17, 19, 20, 14	2071	0.00244	0.02212
	5	5, 6, 12, 18, 19, 22	2013	0.00236	0.02532
	6	8, 10, 17—19, 24	3729	0.00551	0.04310

由表1可知,2种充电站的建设节点具有如下相同的特征:当用户捕获程度处在低水平时,系统节点电压偏移与配电网的网络损耗也相应地处于一个较低的水平;当用户捕获程度处于高水平时,意味着在同一时刻接入能量补充站点的EV数量较多,对配电网的影响也较大。不同之处在于:在相同的用户捕获程度下,传统充电站的配电网网络损耗和节点电压偏移值相较于混合充换电站均偏高;随着用户捕获程度的增加,传统充电站的配电网网络损耗和节点电压偏移与混合充换电站的配电网网络损耗和节点电压偏移之间的差值整体呈增大趋势。

此外,传统充电站站点能达到的最大用户捕获程度为3941辆,此时节点电压偏移为0.13024 p.u.,网络损耗为0.15225 MW;混合充换电站站点能达到的最大用户捕获程度为3729辆,虽然略少于传统充电站能达到的最大用户捕获程度,但此时的节点电压偏移仅为0.04310 p.u.,网络损耗仅为0.00551 MW,对电网造成的影响远小于传统充电站。用户捕获程度达到上述水平是本文考虑的一种极端现象,虽然此时混合充换电站的节点电压偏移与网络损耗相较于传统充电站要小,但仍处于一个较高的水平,将对电网电能质量造成严重的影响,所以在实际运行中要对能量补充站点服务的EV数量进行限制,一旦超过服务数量上限,需对站点进行扩建。

5.3 仿真结果分析

根据前文分析及仿真结果可以得到以下结论。

1)传统充电站运行时对电力系统的日负荷曲线影响较大,而混合充换电站可以避免负荷的“峰峰叠加”,通过将共享EV的充电负荷转移至低谷时段,可以有效地提高电网的电能质量,防止负荷过大对电网造成的冲击。

2)对比传统充电站和混合充换电站的建站选址方案的仿真结果可知,在同等的用户捕获程度下,传统充电站产生的网络损耗和电压偏移相比混合充换

电站更大。

3)在实际建站过程中,由于共享EV混合充换电站加入了换电设施,相比传统充电站增加了换电设施的初始投资成本,但当为同样数量的EV提供服务时,混合充换电站的建站容量要远小于传统充电站,投资费用随之减少。同时,混合充换电站便于扩建且设施较易转移,运营商能够通过电价低谷时段对电池进行充电来降低站点的运行成本。综上所述,混合充换电站的投资回报潜力远高于传统充电站。

4)不同的建站选址方案对电网的影响各不相同,若要保证较大的用户捕获程度,则混合充换电站对配电网造成的网络损耗和节点电压偏移也相应较大;若保证配电网的网络损耗和节点电压偏移较小,则混合充换电站对用户的捕获程度将降低。综上所述,决策者需要权衡利益关系,以NSGA-II计算所得Pareto最优解集为基础,结合实际的地理位置城市规划,决策得到需要建设共享EV充换电站的节点,保证用户使用的便捷性,同时也兼顾电网的利益。

6 结论

本文结合城市交通网络和城市配电网系统两方面对未来城市发展中共享EV混合充换电站的选址问题进行了分析,构建了综合考虑用户和电网双方利益的规划模型,并利用NSGA-II进行求解。最后,基于算例数据验证了所建模型的有效性和实用性。

需要说明的是:本文给出的方案是根据Pareto最优解集得到的,但由于本文所建模型中的目标之间存在冲突,这使得某个目标的解在得到改进的同时会使其他目标的解变差。这也是该类解决多目标寻优问题方法的通病。针对以上问题,笔者下一步将采用博弈论的方法进一步确定最优解。本文研究规定EV的行驶路线为最短路线,但在实际情况中由于车流量较大等诸多原因,用户可能不会选择最短路线,这也是后续研究需要解决的问题。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 郭朝先. 2060年碳中和引致中国经济系统根本性变革[J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2021, 21(5): 64-77.
GUO Chaoxian. Carbon neutrality by 2060 leads to fundamental changes in China's economic system[J]. Journal of Beijing University of Technology(Social Sciences Edition), 2021, 21(5): 64-77.
- [2] 赵黄江, 向月, 刘俊勇, 等. 基于改进配电网安全域的规模化电动汽车入网影响分析[J/OL]. 电力自动化设备. (2021-05-25) [2021-06-28]. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202105025>.
- [3] 王浩林, 张勇军, 毛海鹏. 基于时空特征变量数据分析的共享汽车充电负荷预测方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(12): 169-175.
WANG Haolin, ZHANG Yongjun, MAO Haipeng. Charging load prediction method of shared vehicles based on data analysis of spatiotemporal characteristic variables[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(12): 169-175.
- [4] 赵书强, 周靖仁, 李志伟, 等. 基于出行链理论的电动汽车充电需求分析方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(8): 105-112.
ZHAO Shuqiang, ZHOU Jingren, LI Zhiwei, et al. EV charging demand analysis based on trip chain theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 105-112.
- [5] 曾梦隆, 韦钢, 朱兰, 等. 交直流配电网中电动汽车充换储一体站规划[J/OL]. 电力系统自动化. (2021-05-26) [2021-06-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20210524.1438.006.html>. DOI: 10.7500/AEPS20210112007.
- [6] DEVECI M, CANITEZ F, GÖKAŞAR I. WASPAS and TOPSIS based interval type-2 fuzzy MCDM method for a selection of a car sharing station[J]. Sustainable Cities and Society, 2018, 41: 777-791.
- [7] CHANG J, YU M, SHEN S Q, et al. Location design and relocation of a mixed car-sharing fleet with a CO₂ emission constraint[J]. Service Science, 2017, 9(3): 205-218.
- [8] GAMBELLA C, MALAGUTI E, MASINI F, et al. Optimizing relocation operations in electric car-sharing[J]. Omega, 2018, 81: 234-245.
- [9] 范志成, 朱俊澎, 袁越, 等. 基于改进型直流潮流算法的主动配电网分布式电源规划模型及其线性化方法[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 504-513.
FAN Zhicheng, ZHU Junpeng, YUAN Yue, et al. Distributed generation planning model of active distribution network and linearization method based on improved DC power flow algorithm[J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 504-513.
- [10] 刘晋源, 吕林, 高红均, 等. 计及分布式电源和电动汽车特性的主动配电网规划[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(12): 41-48.
LIU Jinyuan, LÜ Lin, GAO Hongjun, et al. Planning of active distribution network considering characteristics of distributed generator and electric vehicle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(12): 41-48.
- [11] 李智, 侯兴哲, 刘永相, 等. 基于深度学习的充电站容量规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(21): 67-73.
LI Zhi, HOU Xingzhe, LIU Yongxiang, et al. A capacity planning method of charging station based on depth learning[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(21): 67-73.
- [12] 陈皓, 李雪芹, 申泰崑. 共享汽车停放区域优化布局仿真[J]. 计算机仿真, 2018, 35(9): 125-130.
CHEN Hao, LI Xueqin, SHEN Taikun. Parking spots optimization and simulation of the car sharing[J]. Computer Simulation, 2018, 35(9): 125-130.
- [13] 张美霞, 蔡雅慧, 杨秀, 等. 考虑用户充电差异性的家用电动汽车充电需求分布分析方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(2): 154-163.
ZHANG Meixia, CAI Yahui, YANG Xiu, et al. Charging demand distribution analysis method of household electric vehicles considering users' charging difference[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(2): 154-163.
- [14] 李小雨, 肖汉, 李嘉逸. 使用卡尔曼滤波修正蒙特卡洛算法的电动汽车充电负荷预测研究[J]. 四川电力技术, 2019, 42(5): 37-40, 50.
LI Xiaoyu, XIAO Han, LI Jiayi. Research on load forecasting for electric vehicle charging using Monte Carlo method modified by Kalman filter[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2019, 42(5): 37-40, 50.
- [15] 刘新天, 尤俊杰, 何耀, 等. 基于试验设计的电动汽车充换电站接入电网的降损研究[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(9): 70-76.

- LIU Xintian, YOU Junjie, HE Yao, et al. Research on power loss reduction considering electric vehicle charging and swapping station based on DOE[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(9): 70-76.
- [16] 江岳春, 曾诚玉, 邹嘉嘉, 等. 基于改进NSGA-II的综合能源多主体利益均衡优化调度[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(7): 17-23.
- JIANG Yuechun, ZENG Chengyu, HUAN Jiajia, et al. Multi-agent interest balance optimization scheduling of integrated energy based on improved NSGA-II[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(7): 17-23.
- [17] 陈红坤, 夏方舟, 袁栋, 等. 直流配电网中含光伏的电动汽车快速充电站优化配置方案[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(16): 53-60.
- CHEN Hongkun, XIA Fangzhou, YUAN Dong, et al. Optimal configuration scheme of fast electric vehicle charging station with photovoltaic in DC distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(16): 53-60.
- [18] 王育飞, 蔡传高, 薛花. 基于改进NSGA-II的社区电动汽车充电站优化充电策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(12): 109-115.
- WANG Yufei, CAI Chuangao, XUE Hua. Optimized charging strategy of community electric vehicle charging station based on improved NSGA-II[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(12): 109-115.
- [19] 王守相, 王成山. 现代配电系统分析[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2014: 245-248.

作者简介:



栗 然

栗 然(1965—),女,河北石家庄人,教授,博士,主要研究方向为新能源与并网技术、电力系统分析及运行与控制(E-mail: liranlelele@163.com);

臧向迪(1997—),女,河北衡水人,硕士研究生,通信作者,研究方向为新能源电力系统优化调度(E-mail: 745386482@qq.com)。

(编辑 陆丹)

Location optimization of hybrid charging and changing station for shared electric vehicles

LI Ran, ZANG Xiangdi, ZHANG Wenxin, LUO Donghui, LI Pengcheng

(College of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071000, China)

Abstract: The way of replacing batteries which is convenient and efficient will become the main way to replenish power for shared EVs(Electric Vehicles) in future cities. In order to establish a hybrid charging and changing station with high efficiency, low cost and power grid friendliness, Monte Carlo simulation method is used to forecast the charging load of shared EVs based on shared EVs' leasing rule and charging data such as power, time, and so on. Then, a multi-objective optimal planning model of hybrid charging and changing station for shared EVs is established with the goals of maximizing user capture degree of charging and changing station for shared EVs and minimizing network loss and voltage offset of distribution system. Finally, the improved NSGA-II (Nondominated Sorting Genetic Algorithm II) with elite strategy is used to solve the multi-objective model, and the Pareto optimal solution set is obtained. Taking 25-node traffic network and IEEE 33-bus distribution system as the example, the feasibility of the proposed model is verified, which can provide feasible experience for the construction of hybrid charging and changing station for shared EVs.

Key words: shared electric vehicles; hybrid charging and changing station; multi-objective optimization; NSGA-II; Pareto optimal solutions

附录 A

表 A1 共享 EV 无序充电参数
Table A1 Disordered charging parameters of shared EVs

起始充电时刻	起始充电时间分布	充电功率/kW	充电概率
07:00—20:00	$N(12.5, 0.5^2)$	60	0.4
20:00 至次日 07:00	$N(20.5, 2.3^2)$	7	0.6

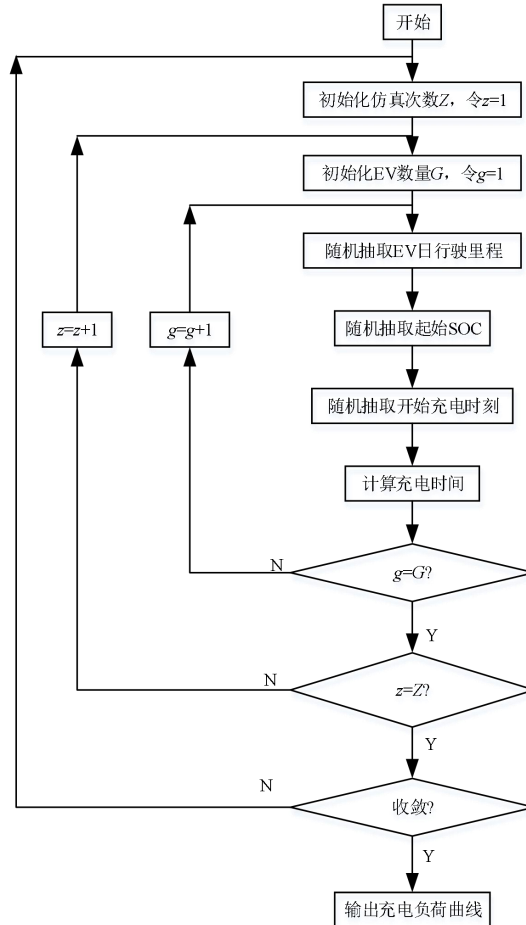


图 A1 无序充电负荷预测流程图
Fig.A1 Flowchart of predicting disordered charging load

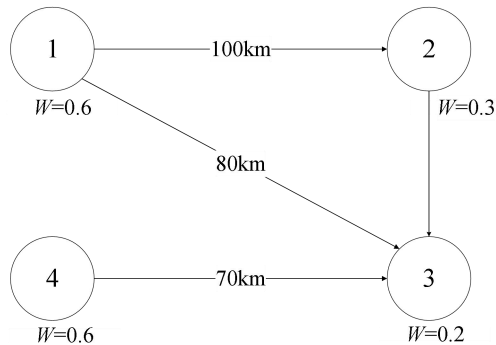


图 A2 路网生成节点示意图
Fig.A2 Schematic diagram of generating nodes of road network

1	2	3	4	5	...	$N-1$	N
0	0	1	0	0	...	0	1

图 A3 染色体编码形式
Fig.A3 Chromosome coding pattern

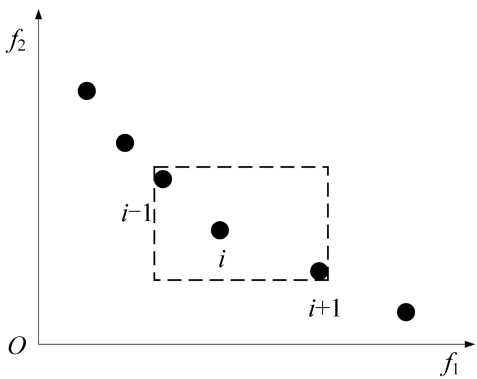


图 A4 个体的拥挤度
Fig.A4 Crowding degree of individuals

附录 B

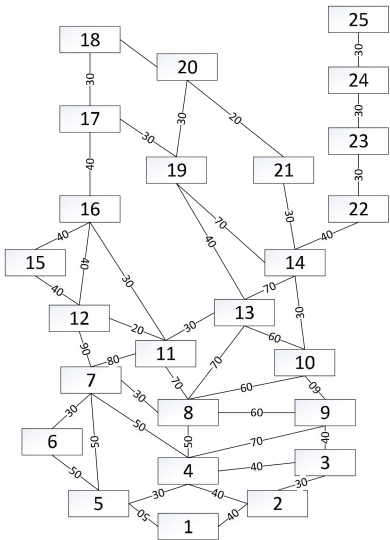


图 B1 25 节点交通网络
Fig.B1 25-node traffic network

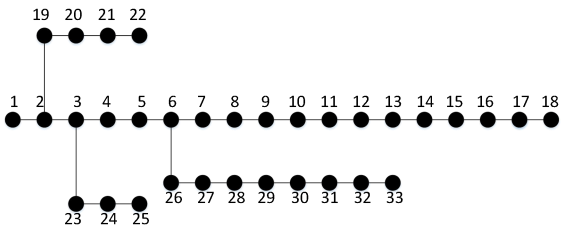


图 B2 IEEE 33 节点配电系统
Fig.B2 IEEE 33-bus distribution system

表 B1 各交通节点权重系数
Table B1 Weight coefficients of each traffic node

节点	权重	节点	权重	节点	权重	节点	权重
1	0.54	8	0.54	15	0.27	22	0.54
2	0.80	9	0.27	16	0.27	23	0.05
3	0.27	10	0.54	17	0.27	24	1.34
4	0.27	11	0.05	18	1.07	25	0.05
5	0.27	12	0.54	19	0.80		
6	0.07	13	0.05	20	0.27		
7	0.05	14	0.54	21	0.27		