

考虑车辆充电调度机制的电动公交车充电站规划

肖 白¹,朱珈汎¹,姜 卓²,焦明曦³,王 徕³

(1. 东北电力大学 电气工程学院,吉林 吉林 132012;2. 北华大学 计算机科学技术学院,吉林 吉林 132021;
3. 国网吉林省电力有限公司 长春供电公司,吉林 长春 130021)

摘要:针对电动公交车充电站的最佳充电容量难以确定及其充电效率低的问题,提出了一种在站址既定情况下考虑车辆充电调度机制的电动公交车充电站优化规划方法。首先,根据电动公交车的发车状态模拟电动公交车日常运行中的电能消耗,生成电动公交车的总运行负荷时序曲线;然后,基于生成的运行负荷时序曲线,构建充电需求度指标,制定电动公交车的充电调度机制;最后,在满足电动公交车充电需求的同时兼顾充电站精细化规划的要求,建立以充电能力最强、投资运行成本最小、光伏能源综合利用指标最大为优化目标的充电站多目标优化规划模型,并采用小生境多目标粒子群优化算法对该模型进行求解,以确定电动公交车充电站的充电桩数量以及光伏发电系统和配电变压器的容量。工程实例分析结果验证了所提方法的正确性和有效性。

关键词:电动公交车;充电站;车辆充电调度机制;多目标规划;小生境多目标粒子群优化算法

中图分类号:U 469.72;TM 715

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202108019

0 引言

面对全球化石能源日渐枯竭和环境污染问题凸显的双重挑战,大力发展和普及电动汽车EV(Electric Vehicle)成为有效的应对措施之一^[1-2],EV充电站的规划和建设则是实现该应对措施的关键环节。电动公交车EB(Electric Bus)作为EV的代表,能够推动居民的低碳生活和绿色出行,应快速推广普及其应用,故开展对EB充电站规划建设的研究迫在眉睫^[3]。

针对充电站最佳充电容量难以确定的问题,文献[4]采用Voronoi图思想和需求点栅格化理论,结合Floyd最短路径算法划分充电站的服务范围,建立了考虑充电站运营商、EV用户以及电网企业综合利益的充电站选址定容规划模型;文献[5-6]分析了EV用户、EV充电站和配电网的关系,构建了基于用户出行特性和配电线路可用裕度的充电站规划模型;文献[7-8]在分析了EV充电对配电网影响的基础上,提出了考虑削峰填谷的充电站规划方法;文献[9-10]考虑了EV续航能力不足的问题,基于EV历史行驶数据,利用排队论的思想对其充电进行优化布局。但是,上述定容方法都是以EV(除EB以外)为对象展开研究,且常规EV充电站的规模相对较小,布局分散,所以难以将其直接应用于集中式大型EB充电站规划中。

针对充电站充电效率低的问题,文献[11]在规划中考虑了用户对充电的满意程度,计及用户充电等待时间成本,以减少充电时间,提高了充电效率;文献[12]根据实时交通信息,对EV进行最优的路径规划与充电导航,以提高EV充电效率;文献[13]以低压直流多接口充电设施为研究对象,解决了充电站、住宅小区充电桩配合为EV进行充电的优化问题,使充电效率得到进一步提高;文献[14-15]对EV无序充电行为加以引导,对EV进行优化充电,使其趋于有序,以提高充电效率。然而,由于EB的行驶路线和时间都是相对固定的,不存在路径优化、无序充电问题,以及EB充电站与其他EV充电站、充电桩相互配合的问题,上述提高充电效率的方法并不适用于EB充电站。

目前与EB充电站相关的研究主要集中在充电负荷预测、充电站规划、充电优化策略3个方面。已有充电负荷预测方法^[16]必须在已有实测历史负荷数据的场景下才能够实现,但是在制定EB充电站规划方案的过程中并没有历史充电负荷数据,此时该充电负荷预测方法是失效的。文献[17]重点研究了EB充电站的选址问题,虽然确定了各充电站的容量,但是未对站内充电桩的额定容量进行优化,所以无法保证所规划的充电站容量是最优的。现有EB充电优化策略的研究^[18-19]均不适用于制定含屋顶光伏的EB充电站。

针对上述问题,本文提出了一种在站址既定情况下考虑车辆充电调度机制的EB充电站容量规划方法,并以东北某城市经济技术开发区的实际工程为例,验证了所提方法的正确性和有效性。

收稿日期:2021-04-16;修回日期:2021-06-25

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)

1 基本原理

考虑车辆充电调度机制的EB充电站规划方法的基本原理示意图如图1所示。图中,目标函数和约束条件的具体说明见第3节。

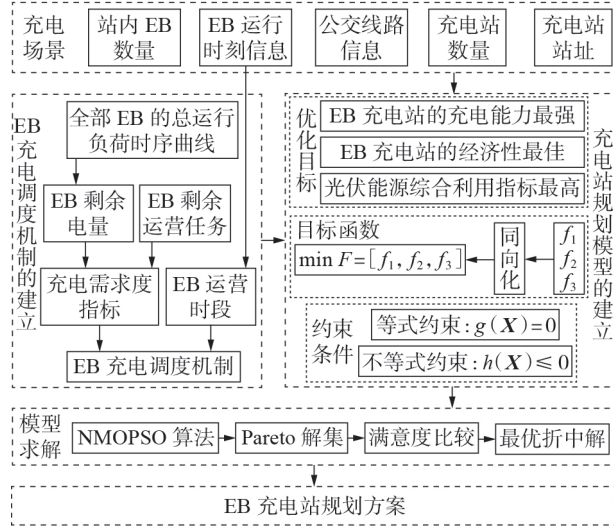


图1 考虑车辆充电调度机制的EB充电站规划方法的基本原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of basic principle of EB charging station planning method considering vehicle charging scheduling mechanism

1) 充电场景分析。EB充电站的选址涉及市政、交通、电力等多个部门的协同规划,本文在政府部门给定的总规和控规(即EB充电站的站址和数量已经确定)的基础上,在已知充电站内EB数量、公交线路信息和EB运行时刻信息的条件下,主要对EB充电站内充电桩的容量优化配置问题进行规划研究。

2) EB充电调度机制的建立。通过EB的运营信息生成全部EB的总运行负荷时序曲线,构建EB充电需求度指标,分析EB充电的多种场景,制定EB充电调度机制,以合理的充电次序满足EB的电能需求,提高充电站的充电效率。

3) 充电站规划模型的建立。EB充电站作为公共基础设施,其首要任务是保证EB正常运营的电能需求,其次考虑EB充电站的投资运行成本和充电优化效果。鉴于此,本文建立以EB充电站的充电能力最强、充电站的经济性最佳、光伏能源综合利用指标最高为目标的多目标优化规划模型。

4) 规划模型的求解。本文采用小生境多目标粒子群优化 NMOPSO (Niche Multi-Objective Particle Swarm Optimization) 算法对模型进行求解,得到EB充电站多目标规划模型的 Pareto 解集,然后计算满意度,选取满意度最高的解作为模型的最优折中解,并基于此制定最终的EB充电站规划方案。

2 EB充电特性分析

2.1 EB的运营特性

根据人流量、发车时刻和发车时间间隔的差异,可将EB的运营时段划分为峰(包括早晚峰和午峰)、平、谷3类。日内EB的运营时段和停运时段如图2所示,且时段划分情况因地而异。

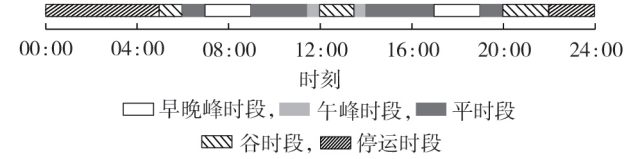


图2 EB的运营时段和停运时段

Fig.2 Operation and outage periods of EB

各EB线路的运营距离和人流量存在差异,使得每条线路上的EB在峰、平、谷3类运营时段的发车数量与发车时间间隔不尽相同,因此公交线路配备的EB数量应取该条线路上所有时段所需EB的最大数量。此外,为了保证公共交通正常运营,公交线路通常需要配备一定数量的EB作为备用。单条线路上运行的EB数量 n_{EB} 的计算公式如式(1)所示。

$$n_{EB} = \max \{ n_{EB,g}^i, n_{EB,p}^j, n_{EB,d}^k \} + n_{EB,b} \quad (1)$$

$$n_{EB,g}^i = \frac{n_{EB,g,o}^i}{n_{EB,g,r}^i}, n_{EB,p}^j = \frac{n_{EB,p,o}^j}{n_{EB,p,r}^j}, n_{EB,d}^k = \frac{n_{EB,d,o}^k}{n_{EB,d,r}^k} \quad (2)$$

式中: $n_{EB,g}^i$ ($i=1, 2, \dots, N_g$) 为满足峰时段 i 的运营需求所需的EB数量, N_g 为日内峰时段数量; $n_{EB,p}^j$ ($j=1, 2, \dots, N_p$) 为满足平时段 j 的运营需求所需的EB数量, N_p 为日内平时段数量; $n_{EB,d}^k$ ($k=1, 2, \dots, N_d$) 为满足谷时段 k 的运营需求所需的EB数量, N_d 为日内谷时段数量; $n_{EB,b}$ 为备用EB的数量; $n_{EB,g,o}^i$ 、 $n_{EB,p,o}^j$ 、 $n_{EB,d,o}^k$ 分别为峰时段 i 、平时段 j 、谷时段 k 的发车数量; $n_{EB,g,r}^i$ 、 $n_{EB,p,r}^j$ 、 $n_{EB,d,r}^k$ 分别为峰时段 i 、平时段 j 、谷时段 k 的单车可连续运行次数。

本文通过确定EB的运营线路、运营时间和发车频率,来模拟各条线路上EB的运营情况,生成全部EB的总运行负荷时序曲线。在生成全部EB的总运行负荷时序曲线时,假设满足如下条件:①所有公交线路上的EB型号和特性参数相同;②各条公交线路上的EB运行相互独立;③EB行驶1 km的耗电量和行驶速度为固定值;④EB严格按照出发车时刻表运行。生成全部EB总运行负荷时序曲线的具体步骤如下:

1) 确定各EB的运营线路,根据式(1)计算每条公交线路需分配的EB数量;

2) 根据各条公交线路上的EB的运行时刻表确定每辆EB的发车次数、发车时刻和到站时刻,统计不同的时段内各EB的运行状态;

3) 根据EB的行驶里程与电能消耗关系,计算

不同时段内各EB电池的荷电状态SOC(State Of Charge)与耗电量,生成该充电站全部EB的总运行负荷时序曲线。

2.2 EB充电站的车辆充电调度机制

若EB采取到站即充的充电机制,则会出现EB充电次数多、单次充电时间短和大量低需求EB占用充电桩的问题,导致站内充电桩不够用,所以需制定EB充电站的车辆充电优化调度机制。

为了量化EB的充电需求程度,本文构建了EB的充电需求度指标,将其记作 Q ,计算式如式(3)所示。充电需求度指标由EB的剩余电量和剩余运营任务决定。

$$Q = K_e \frac{L^{\text{lea}}}{E_{\text{EB}}^{\text{lea}} - E_{\text{EB}}^{\text{min}}} \quad (3)$$

式中: L^{lea} 为EB剩余运营任务的行驶距离,单位为km; $E_{\text{EB}}^{\text{lea}}$ 为EB电池的剩余电量,单位为kW·h; $E_{\text{EB}}^{\text{min}}$ 为EB电池的SOC最低时的电量,单位为kW·h; K_e 为能耗系数,单位为kW·h/km。

将全天划分为 m 个时段,首先根据EB总运行负荷时序曲线在各时段的运行负荷数据计算每个时段内进站EB的充电需求度指标,然后判断当前运营时段的类别(峰、平、谷)和光伏输出功率情况,按照EB充电需求度指标的大小,制定不同充电时段的EB充电调度机制,具体如下。

1)对于光伏输出功率等于优先充电EB的功率需求的时段,由光伏发电为EB供电,此时有:

$$P_{\text{PV}} = \sum_{l=1}^{n_{\text{EB},Q}} P_{l,\text{EB}}^l \quad (4)$$

式中: P_{PV} 为光伏输出功率; $n_{\text{EB},Q}$ 为优先充电EB的数量,本文中取值为充电需求度指标大于站内除备用EB外所有EB的充电需求度平均值的EB数量,故各时段的 $n_{\text{EB},Q}$ 取值可能都不相等; $P_{l,\text{EB}}^l$ 为第 l 辆优先充电EB的功率需求。

2)对于光伏输出功率大于优先充电EB的功率需求的时段,有如下3种情况。

(1)增加充电EB的数量,消纳多余的光伏功率,此时的光伏功率如式(4)所示。

(2)若光伏输出功率仍有裕量,则EB充电站可以调度备用EB,储存多余的光伏功率,有:

$$P_{\text{PV}} = \sum_{l=1}^{n_{\text{EB},Q}} P_{l,\text{EB}}^l + \sum_{p=1}^{n_{\text{EB},b}} P_{p,\text{EB}}^p \quad (5)$$

式中: $P_{p,\text{EB}}^p$ 为第 p 辆备用EB的功率需求。

(3)若光伏输出功率仍有裕量,EB运行负荷需求已得到满足,且无可调度的备用EB,则弃掉多余的光伏输出功率。

3)对于光伏输出功率小于优先充电EB的功率需求的时段,由配电网和光伏同时对EB进行充电,

使其满足运营需求即可,此时有:

$$P_{\text{PV}} + P_{\text{DT}} = \sum_{l=1}^{n_{\text{EB},Q}} P_{l,\text{EB}}^l \quad (6)$$

式中: P_{DT} 为配电网通过配电变压器向EB充电站输送的功率。

3 EB充电站多目标优化规划模型的建立

3.1 以充电能力最强为目标的EB充电站优化规划

3.1.1 目标函数

EB充电站作为公共基础设施,其首要任务是保证EB正常运营的功率需求,为了最大限度地满足EB的功率需求,本文将充电站的充电能力最强作为EB充电站优化规划的目标,根据EB充电调度机制调度的结果,选择日内所有EB充电需求度指标之和最大的时段,考虑满足此时段EB的功率需求,来合理规划充电桩的最佳额定充电功率和数量,目标函数见式(7)。

$$\max A = n_{\text{cha}} P_{\text{cha}} - \sum_{l=1}^{n_{\text{EB},Q}^{\max}} P_{l,\text{EB}}^l \quad (7)$$

式中: A 为EB充电站的充电能力; n_{cha} 为充电桩的数量; P_{cha} 为单个充电桩的额定充电功率; $n_{\text{EB},Q}^{\max}$ 为优先充电EB数量的最大值。

3.1.2 约束条件

1)能满足多辆EB同时充电。

$$n_{\text{cha}} \geq n_{\text{EB},Q}^{\max} \quad (8)$$

2)单个充电桩的额定充电功率范围约束。

$$P_{\text{cha}}^{\min} \leq P_{\text{cha}} \leq P_{\text{cha}}^{\max} \quad (9)$$

式中: $P_{\text{cha}}^{\max}$ 、 $P_{\text{cha}}^{\min}$ 分别为单个充电桩额定充电功率的最大值、最小值。

3)充电桩的最大可建设面积约束。

$$u_{\text{cha}} n_{\text{cha}} s_{\text{cha}} \leq s_{\text{EBCS}} - u_{\text{EB}} n_{\text{EB}} s_{\text{EB}} - s_{\text{bui}} \quad (10)$$

式中: u_{cha} 、 u_{EB} 分别为充电桩、EB的间隔系数; s_{EBCS} 、 s_{EB} 、 s_{bui} 、 s_{cha} 分别为EB充电站、单辆EB、站内建筑物、单个充电桩的占地面积。

4)EB电池的SOC约束。

$$S_{\text{SOC},\min} \leq S_{\text{SOC}} \leq S_{\text{SOC},\max} \quad (11)$$

式中: S_{SOC} 为EB电池的SOC; $S_{\text{SOC},\max}$ 、 $S_{\text{SOC},\min}$ 分别为EB电池SOC的最大值、最小值。

5)EB充电站的充电能力最低限值约束。

$$A \geq A_{\min} \quad (12)$$

式中: $A_{\min}$ 为EB充电站的充电能力最低限值。

3.2 以经济性最佳为目标的EB充电站优化规划

3.2.1 目标函数

为了保证EB充电站投资运行的经济性,本文将EB充电站的年支付成本最小作为EB充电站经济优化的目标函数,见式(13)。

$$\min C = C_1 + C_{\text{OP}} + C_{\text{OM}} \quad (13)$$

$$C_1 = \frac{r_0(1+r_0)^T}{(1+r_0)^T - 1} (C_{1,PV} + n_{cha} C_{1,cha} + S_{DT} C_{1,DT} + C_{1,0}) \quad (14)$$

$$C_{OP} = 365 \sum_{l=1}^{n_{EB}} \sum_{s=1}^m \alpha_{l,s} \beta_{l,s} P_{cha} \Delta t_{l,s} \lambda_{l,s} c_s \quad (15)$$

$$C_{OM} = C_{OM,cha} + C_{OM,DT} + C_{OM,PV} + C_{OM,0} \quad (16)$$

$$C_{1,PV} = N_{PV} P_{PV} c_{PV} \quad (17)$$

$$S_{DT} = \max \left\{ \frac{P_{1,EB}(t) + P_{1,0}(t) - P_{1}^{PV}(t)}{\cos \varphi} \right\} \quad (18)$$

式中: C 为 EB 充电站的年支付成本; C_1 、 C_{OP} 、 C_{OM} 分别为 EB 充电站的年均投资成本、年运行成本、年维护成本; r_0 为贴现率; T 为规划周期; $C_{1,cha}$ 为单个充电桩的投资成本; $C_{1,PV}$ 为屋顶光伏发电系统的投资成本, 计算式见式(17); $C_{1,DT}$ 为单位容量配电变压器的投资成本; $C_{1,0}$ 为其他配套设备的投资成本; S_{DT} 为配电变压器的容量, 计算式见式(18); $\alpha_{l,s}$ 为时段 s 第 l 辆 EB 的运营状态, 若 EB 在站休整则 $\alpha_{l,s} = 1$, 否则 $\alpha_{l,s} = 0$; $\beta_{l,s}$ 为时段 s 第 l 辆 EB 充电时从配电网购电的状态变量, 若从配电网购电则 $\beta_{l,s} = 1$, 否则 $\beta_{l,s} = 0$; $\Delta t_{l,s}$ 为时段 s 第 l 辆 EB 的可用充电时间; $\lambda_{l,s}$ 为时段 s 第 l 辆 EB 由配电网供电的时间占其充电时间的平均比值; c_s 为时段 s 配电网的电价; m 为时段总数; $C_{OM,cha}$ 、 $C_{OM,DT}$ 、 $C_{OM,PV}$ 、 $C_{OM,0}$ 分别为 EB 充电站内所有充电桩、配电变压器、屋顶光伏发电系统、其他配套设备的年均维护成本; N_{PV} 为屋顶光伏阵列的安装数量; c_{PV} 为每组屋顶光伏阵列的投资成本; $P_{1,EB}(t)$ 、 $P_{1,0}(t)$ 、 $P_{1}^{PV}(t)$ 分别为 t 时刻 EB 的充电功率、EB 充电站内其他负荷消耗的功率、负荷消纳的光伏功率; φ 为功率因数角。

3.2.2 约束条件

1) 充电站的年支付成本约束。

$$C \leq C_{\min} \quad (19)$$

式中: $C_{\min}$ 为充电站年支付成本的最小值。

2) 充电站的功率平衡约束。

$$P_{1}^{PV}(t) + P_{DT}(t) - P_{1,EB}(t) - P_{1,0}(t) = 0 \quad (20)$$

式中: $P_{DT}(t)$ 为 t 时刻配电网通过配电变压器向 EB 充电站输送的功率。

3) 配电网节点电压幅值上下限约束。

$$V_{i'}^{\min} \leq V_{i'} \leq V_{i'}^{\max} \quad i' \in N' \quad (21)$$

式中: $V_{i'}$ 为配电网中节点 i' 的电压幅值; $V_{i'}^{\max}$ 、 $V_{i'}^{\min}$ 分别为配电网中节点 i' 电压幅值的上、下限; N' 为规划区域内配电网的负荷节点集合。

4) 配线路容量约束。

$$P_{EBCS} + \sum P_{1,Load} \leq P_{1}^{\max} \quad (22)$$

式中: P_{EBCS} 为日内 EB 充电站消耗的总有功功率; $\sum P_{1,Load}$ 为日内线路上其他负荷消耗的有功功率; $P_{1}^{\max}$ 为馈线所能接入的最大功率, 由馈线上所带负荷和馈线的传输能力决定。

3.3 以光伏能源综合利用指标最高为目标的 EB 充电站优化规划

3.3.1 目标函数

在充电站内建设合理容量的屋顶光伏发电系统能够为充电站运营带来效益。屋顶光伏发电系统应以服务 EB 充电为目的, 其所发电能应尽量满足 EB 充电负荷需求。为了合理消纳光伏电能, 减少不必要的能源浪费, 本文将光伏能源综合利用指标最高作为目标以优化配置光伏容量, 目标函数见式(23)。

$$\max \mu = \frac{\int_0^{24} P_{1}^{PV}(t) dt}{\int_0^{24} (P_{1,EB}(t) + P_{1,0}(t)) dt} + \frac{\int_0^{24} P_{1}^{PV}(t) dt}{\int_0^{24} P_{\Sigma}^{PV}(t) dt} \quad (23)$$

$$P_{\Sigma}^{PV}(t) = \eta s_{PV} I_{PV}(t) \quad (24)$$

式中: μ 为光伏能源综合利用指标; $P_{\Sigma}^{PV}(t)$ 为 t 时刻光伏系统能够输出的理论功率; η 为光电综合转化效率; s_{PV} 为屋顶光伏阵列的建设面积; $I_{PV}(t)$ 为 t 时刻的光照强度。

3.3.2 约束条件

1) 光伏阵列的建设面积约束。

$$s_{PV} < s_{bui} \quad (25)$$

2) 光伏能源综合利用指标值约束。

$$\mu > \mu_{\min} \quad (26)$$

式中: $\mu_{\min}$ 为光伏能源综合利用指标的最小值。

3.4 EB 充电站的多目标优化规划模型

配电变压器的容量随充电桩和光伏发电系统的容量变化而变化, 故在确定充电桩和光伏发电系统的容量后, 配电变压器的容量也随之确定。本文以充电桩数量、单个充电桩的额定充电功率和光伏发电系统的容量为变量, 综合考虑 EB 充电站的充电能力、光伏能源综合利用指标和充电站的经济性, 建立 EB 充电站的多目标优化规划模型, 见式(27)。

$$\begin{cases} \min F = [f_1, f_2, f_3] \\ \text{s.t. } g(X) = 0 \\ h(X) \leq 0 \end{cases} \quad (27)$$

式中: F 为 EB 充电站的多目标优化函数; $f_1 = 1/A$; $f_2 = 1/\mu$; $f_3 = C$; X 为决策变量向量; $g(X) = 0$ 为等式约束条件; $h(X) \leq 0$ 为不等式约束条件。

4 EB 充电站多目标优化规划模型的求解

含屋顶光伏系统的 EB 充电站规划是一个多变量、多目标、非线性的复杂优化问题。目前, 多目标优化问题的求解方法包括 2 类: 一类是通过引入权重因子, 将多目标优化问题转化为单目标优化问题; 另一类是通过多目标优化算法直接对多目标问题进行求解, 通过寻求 Pareto 解集进而得到模型的最优解。但由于前者所得结果在很大程度上依赖于权重的合理选取, 在实际运用中的效果并不理想, 本文选

择采用 NMOPSO 算法^[20]进行求解,寻求 Pareto 解集进而得到规划模型的最优解。

4.1 小生境的共享机制

1) 小生境子群的划分。

将任意一个模型的可行解看作一个 n 维的空间粒子 $X_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}]^T$, 其与另一个解 $X_j = [x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jn}]^T$ 的欧氏距离为 $d_{i,j}$, 若粒子 X_j 为某一局部最优解且 $d_{i,j} < \xi$ (ξ 为给定参数), 则 X_i 属于以 X_j 为中心的小生境。欧氏距离 $d_{i,j}$ 的计算式为:

$$d_{i,j} = \|X_i - X_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^n (x_{ik} - x_{jk})^2} \quad i, j = 1, 2, \dots, N_s \quad (28)$$

式中: N_s 为第 S 个小生境子群的规划模型解个数。

2) 粒子之间信息的共享。

可行解之间根据欧氏距离的大小实现不同程度的信息共享, 其共享深度可由共享函数 f_{sh} 表示, 见式(29)。

$$f_{sh}(d_{i,j}) = \begin{cases} 1 - (d_{i,j}/\xi)^\varepsilon & 0 \leq d_{i,j} < \xi \\ 0 & d_{i,j} \geq \xi \end{cases} \quad (29)$$

式中: ε 为共享函数的形状参数, 一般取值为 1 或 2。

3) 适应值函数的更新。

根据小生境可行解间的共享信息更新粒子 X_i 的适应值 F_i , 见式(30)。

$$F_i = 1/G_i \quad (30)$$

$$G_i = \sum_{j=1}^{N_s} f_{sh}(d_{i,j}) \quad (31)$$

式中: G_i 为粒子 X_i 的共享度。

4.2 最优解的确定方法

应用模糊隶属度函数表示每个 Pareto 解集对各目标函数的满意度, 然后权衡各目标函数的满意度, 从 Pareto 解集中选取满意度最高的解作为规划模型的最优折中解。满意度的计算式为:

$$\rho = \frac{1}{n_f} \sum_{i=1}^{n_f} \rho_i \quad (32)$$

$$\rho_i = \begin{cases} 1 & f_i < f_{i,\min} \\ \frac{f_{i,\max} - f_i}{f_{i,\max} - f_{i,\min}} & f_{i,\min} \leq f_i \leq f_{i,\max} \\ 0 & f_i > f_{i,\max} \end{cases} \quad (33)$$

式中: ρ 为标准化的满意度值; n_f 为待优化目标函数的数量; ρ_i 为对第 i 个目标函数 f_i 的解的满意度; $f_{i,\max}$ 、 $f_{i,\min}$ 分别为第 i 个目标函数的上、下限值。

4.3 模型的求解步骤

采用 NMOPSO 算法求解 EB 充电站优化规划模型的具体步骤如下。

1) 输入原始数据并进行初始化数据处理。输入 EB 充电站的信息数据及最大迭代次数 $K_{\max}$, 根据 EB 的发车顺序对每辆 EB 进行编号, 同时根据当日发车时间表模拟 EB 运行, 确定各时刻每辆 EB 电池的

SOC, 生成 EB 的 SOC 矩阵。

2) 初始化粒子群中粒子的数量 N_p , 随机生成粒子的初始位置 X_0 和初始速度 v_0 , 随机选择每个小生境的初始中心粒子 X_s , 令迭代次数 $K=0$ 。本文以充电桩数量、单个充电桩的额定充电功率和光伏发电系统的容量为变量, 则粒子的信息可用 3 维向量表示, 位置向量为 $X_i = [x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}]^T$, 速度向量为 $v_i = [v_{i1}, v_{i2}, v_{i3}]^T$ 。

3) 根据式(28)计算每个粒子与所有中心粒子的欧氏距离, 确定每个小生境子群的粒子元素。

4) 分别根据式(7)、式(13)和式(23)计算每个粒子的充电能力、充电站的年支付成本和光伏能源综合利用指标。判断每个粒子是否满足式(27)中的等式约束和不等式约束, 排除不满足约束的粒子, 并更新每个小生境子群粒子的速度与位置, 利用共享机制提高粒子的适应度, 删除适应度低的粒子, 保留每个小生境子群中的非劣个体, 根据适应度值大小更新每个小生境的中心粒子 X_s 。

5) 若 $K > K_{\max}$, 则输出每个小生境子群的非劣个体组成 Pareto 非劣解集; 否则令 $K = K + 1$, 重复步骤 3) 至步骤 5), 继续搜索。

6) 根据式(32)求取多目标优化函数 F 对每个 Pareto 解集的满意度, 按照满意度值的大小选择最优折中解, 由最优折中解得到最终的 EB 充电站规划方案。

5 算例分析

以东北某城市经济技术开发区的实际工程为例, 在充电站站址既定的情况下, 按照本文所提方法对一座占地面积为 90 000 m² 的 EB 充电站进行规划。该 EB 充电站的参数见附录 A 表 A1—A4。基于表 A1 和表 A4 中的数据, 模拟各条线路上 EB 的运营情况, 生成全部 EB 的总运行负荷时序曲线, 见附录 A 图 A1。根据本文所提规划方法进行计算, 含屋顶光伏系统的 EB 充电站需要建设 28 个额定充电功率为 150 kW 的充电桩, 并需配置 2 MW 的屋顶光伏发电系统。

对该规划区域内某典型日 2 MW 光伏发电系统的输出功率情况进行分析, 生成光伏输出功率时序曲线, 并考虑 EB 充电调度机制, 按照车辆充电和站内其他负荷的运行情况, 生成充电站的日负荷曲线。配电网供电功率和光伏发电系统输出功率曲线如图 3 所示。

在充电桩数量确定的情况下, 分析单个充电桩的额定充电功率和光伏发电系统容量对光伏能源综合利用指标的影响, 不同光伏发电系统容量下光伏能源综合利用指标结果如图 4 所示。根据式(7)—(12)

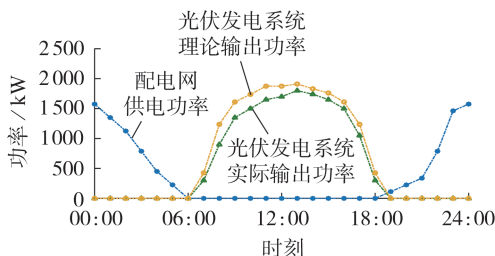


图3 配电网供电功率和光伏发电系统输出功率曲线

Fig.3 Supply power curve of distribution network and output power curves of photovoltaic power generation system

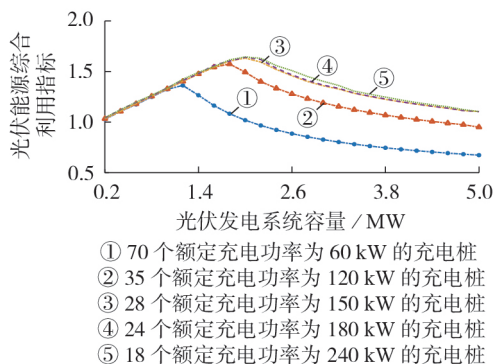


图4 不同光伏发电系统容量下光伏能源综合利用指标结果

Fig.4 Comprehensive utilization index results of photovoltaic energy with different capacities of photovoltaic power generation system

计算对该充电站的最佳充电桩额定充电功率及与之相匹配的充电桩数量,当选择额定充电功率为60 kW的充电桩时,其最佳数量为70个。同理,可以计算得到其他额定充电功率对应的最佳充电桩数量。

光伏能源综合利用指标能够反映能源的利用和浪费情况,由图4可知:在指标值达到峰值前,光伏能源得到了充分利用,综合利用指标值随着光伏发电系统容量的增大而增大;指标值达到峰值后,负荷不能及时消纳过量的光伏电量,导致出现弃光现象,造成了能源浪费,光伏综合利用指标随着光伏发电系统容量的增大而减少。此外,在充电桩数量确定的情况下,充电桩的额定充电功率也会影响光伏能源综合利用指标值的大小:当采用额定充电功率为60~150 kW的充电桩时,光伏能源综合利用指标的最大值随着额定充电功率的增加会大幅度增大;但当采用额定充电功率大于150 kW的充电桩时,随着额定充电功率的增加,光伏能源综合利用指标最大值基本不变。为此,本文选用额定充电功率为150 kW的充电桩,既可以充分消纳光伏能源,又可以减少充电站的充电桩投资成本。

考虑与不考虑充电调度机制时配电网供电功率、EB充电站的规划方案结果分别如图5和表1所示。

由图5可知,配电网供电功率主要集中在00:00—04:00、21:00—24:00。在不考虑充电调度机制的情形下,EB充电站不能充分利用光伏电能,为了满足EB的充电功率需求,EB充电站需在07:00—11:00和14:00—18:00这2个时段从配电网购电,但这2个时段的电价相对较高,势必会增加EB充电站的运行成本;在考虑充电调度机制的情形下,优先消纳光伏电能,提高了光伏能源利用率,同时减少了EB充电站的日购电量,节约了充电站的运行费用。由表1可知,充电调度机制能够优化EB充电,从而影响EB充电站的规划结果。相较于不考虑充电调度机制的情形,考虑充电调度机制时EB日内平均充电次数由5次降至3次,日购电量降低了约35%,年支付成本降低了约19%。总体而言,EB充电调度机制不仅能够减少EB电池的充电次数,提高EB充电站的充电效率,还能减少充电站的日购电量与充电桩容量,从而提高EB充电站投资运行的经济性。

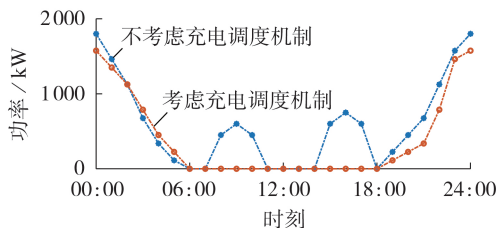


图5 考虑与不考虑充电调度机制时的配电网供电功率曲线

Fig.5 Supply power curves of distribution network with and without considering charging scheduling mechanism

表1 考虑与不考虑充电调度机制时的EB充电站规划方案

Table 1 Planning scheme of EB charging station with and without considering charging scheduling mechanism

参数	结果	
	不考虑充电调度机制	考虑充电调度机制
EB日内平均充电次数	5	3
EB充电站日购电量/(kW·h)	13012	8434
电网供电负荷峰谷差/kW	1200	1050
光伏能源综合利用指标	单个充电桩额定充电功率为60 kW	1.01
	单个充电桩额定充电功率为120 kW	1.21
	单个充电桩额定充电功率为150 kW	1.38
	单个充电桩额定充电功率为180 kW	1.60
	单个充电桩额定充电功率为240 kW	1.65
	选用的单个充电桩的额定充电功率/kW	150
规划的充电桩个数	30	28
年支付成本/万元	192	155

6 结论

本文在EB充电站站址既定的情况下,针对EB充电站最佳充电容量难以确定及其充电效率低的问题,提出了一种考虑车辆充电调度机制的EB充电站规划方法,所得结论如下:

1)建立充电需求度指标,保证了高需求EB的充电优先性,减少了EB的充电次数,提高了EB充电站的充电效率;

2)分别以充电能力最强、投资运行成本最小、光伏能源综合利用指标最大为优化目标,以EB充电需求度指标为依据,以EB优化充电调度机制为保障,构建了充电站多目标优化规划模型,并采用NMOPSO算法进行求解,既考虑了EB的充电需求,又兼顾了精细化规划的要求,在理论上解决了EB充电站最佳充电配置容量难以确定的问题。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] NANA E A, KORONEOS C J. Climate change mitigation and deployment of electric vehicles in urban areas[J]. Renewable Energy, 2016, 99(2): 1153-1160.
- [2] 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.
- [3] SUN Xiaoli, LI Zhengguo, WANG Xiaolin, et al. Technology development of electric vehicles: a review[J]. Energies, 2020, 13(1): 90-102.
- [4] 艾欣, 李一铮, 王坤宇, 等. 基于混沌模拟退火粒子群优化算法的电动汽车充电站选址与定容[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(9): 9-14.
AI Xin, LI Yizheng, WANG Kunyu, et al. Locating and sizing of electric vehicle charging station based on chaotic simulated annealing particle swarm optimization algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(9): 9-14.
- [5] HUANG X Q, CHEN J, YANG H, et al. Economic planning approach for electric vehicle charging stations integrating traffic and power grid constraints[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(17): 3925-3934.
- [6] 李宏仲, 强伟, 高宇男, 等. 考虑用户出行特性和配电网线路可用裕度的充电站规划[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(23): 48-56.
LI Hongzhong, QIANG Wei, GAO Yunan, et al. Charging station planning considering users' travel characteristics and line availability margin of distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(23): 48-56.
- [7] 所丽, 唐巍, 白牧可, 等. 考虑削峰填谷的配电网集中型充电站选址定容规划[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(7): 1052-1060.
SUO Li, TANG Wei, BAI Muke, et al. Locating and sizing of centralized charging stations in distribution network considering load shifting[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(7): 1052-1060.
- [8] XIONG Y H, GAN J R, AN B, et al. Optimal electric vehicle fast charging station placement based on game theoretical framework[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018, 19(8): 2493-2504.
- [9] 付凤杰, 方雅秀, 董红召, 等. 基于历史行驶路线的电动汽车充电站布局优化[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(12): 72-80.
FU Fengjie, FANG Yaxiu, DONG Hongzhao, et al. Optimized allocation of charging stations for electric vehicles based on historical trajectories[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(12): 72-80.
- [10] 孟旭瑶, 张维戈, 鲍彦, 等. 考虑充电功率的电动汽车快充站电设施优化配置[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(7): 28-34.
MENG Xuyao, ZHANG Weige, BAO Yan, et al. Optimal configuration of charging facility for electric vehicle fast charging station considering charging power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7): 28-34.
- [11] 王行行, 赵晋泉, 王珂, 等. 考虑用户满意度和配网安全的电动汽车多目标双层充电优化[J]. 电网技术, 2017, 41(7): 2165-2172.
WANG Xingxing, ZHAO Jinqian, WANG Ke, et al. Multi-objective bi-level electric vehicle charging optimization considering user satisfaction degree and distribution grid security[J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2165-2172.
- [12] 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.
- [13] 李敏, 苏小林, 阎晓霞, 等. 多目标分层分区的电动汽车有序充电优化控制[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3556-3562.
LI Min, SU Xiaolin, YAN Xiaoxia, et al. Coordinated charging and discharging of plug-in electric vehicles based on multi-layered and multi-regional optimization[J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3556-3562.
- [14] 师瑞峰, 梁子航, 马源. 基于TOPSIS方法的居民区电动汽车有序充电策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(21): 104-110, 159.
SHI Ruifeng, LIANG Zihang, MA Yuan. TOPSIS method based orderly charging strategy for electric vehicles in residential area[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(21): 104-110, 159.
- [15] MOHSENIAN-RAD H, GHAMKHARI M. Optimal charging of electric vehicles with uncertain departure times: a closed-form solution[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(2): 940-942.
- [16] 刘文霞, 徐晓波, 周樾. 基于支持向量机的纯电动公交车充/换电站日负荷预测[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(11): 41-47.
LIU Wenxia, XU Xiaobo, ZHOU Xi. Daily load forecasting based on SVM for electric bus charging station[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(11): 41-47.
- [17] 程瑜, 陶冀. 快充模式下电动公交充电网络优化规划模型[J]. 电工技术学报, 2018, 33(增刊2): 586-595.
CHENG Yu, TAO Ji. Optimal planning model of electric bus charging network under fast charging mode[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(Supplement 2): 586-595.
- [18] 陈丽娟, 秦萌, 顾少平, 等. 计及电池损耗的电动公交车参与V2G的优化调度策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(11): 52-62.
CHEN Lijuan, QIN Meng, GU Shaoping, et al. Optimal dispatching strategy of electric bus participating in vehicle-to-grid considering battery loss[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(11): 52-62.

- [19] 杨健维,杨鹤,张夏霖,等. 基于换电规则优化与车辆-电池组匹配的电动公交车充换电站充电优化策略[J]. 中国电机工程学报,2019,39(8):2337-2347.
YANG Jianwei,YANG He,ZHANG Xialin,et al. A charging optimization strategy on charging and swapping station for electric buses based on optimization of switching rules and matching of buses and batteries[J]. Proceedings of the CSEE, 2019,39(8):2337-2347.
- [20] 刘文颖,谢昶,文晶,等. 基于小生境多目标粒子群算法的输电网检修计划优化[J]. 中国电机工程学报,2013,33(4):141-148.
LIU Wenying,XIE Chang,WEN Jing,et al. Optimization of transmission network maintenance scheduling based on niche multi-objective particle[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(4):141-148.

作者简介:



肖 白

肖 白(1973—),男,吉林吉林人,教授,博士,主要研究方向为电力系统规划、空间电力负荷预测、多能源电力系统互补协调发电、继电保护等(E-mail:xbxiaobai@126.com);

朱珈汎(1995—),男,山东淄博人,硕士研究生,主要研究方向为电动汽车充电站规划(E-mail:838649003@qq.com);

姜 卓(1978—),女,吉林吉林人,副教授,研究方向为智能优化算法、软件工程(E-mail:abbey1998@sina.com)。

(编辑 陆丹)

Planning of electric bus charging station considering vehicle charging scheduling mechanism

XIAO Bai¹,ZHU Jiaxun¹,JIANG Zhuo²,JIAO Mingxi³,WANG Yao³

(1. School of Electrical Engineering,Northeast Electric Power University,Jilin 132012,China;

2. School of Computer Science and Technology,Beihua University,Jilin 132021,China;

3. Changchun Power Supply Company,State Grid Jilin Electric Power Co.,Ltd.,Changchun 130021,China)

Abstract: Aiming at the problems that the optimal charging capacity of electric bus charging station is difficult to determine and its charging efficiency is low, an optimal planning method of electric bus charging station considering the vehicle charging scheduling mechanism under the condition of fixed station location is proposed. Firstly, according to the starting state of electric bus, its energy consumption in the daily operation is simulated, and the time-sequence curve of total electric bus operation load is generated. Then, based on the generated time-sequence curve of operation load, the charging demand degree index is constructed to develop the charging scheduling mechanism of electric buses. Finally, while meeting the charging demand of electric buses, taking into account the requirements of the elaborate planning of charging station, a multi-objective optimization planning model for charging station is established, which aims at maximizing the charging capacity, minimizing the investment and operation cost and maximizing the comprehensive utilization index of photovoltaic energy. The NMOPSO (Niche Multi-Objective Particle Swarm Optimization) algorithm is used to solve the model to determine the number of charging piles in electric bus charging station and the capacities of photovoltaic power generation system and distribution transformer. The correctness and effectiveness of the proposed method are verified by the analysis results of engineering examples.

Key words: electric bus; charging station; vehicle charging scheduling mechanism; multi-objective planning; NMOPSO algorithm

附录 A

表 A1 电动公交车参数
Table A1 Parameters of electric bus

参数	取值	参数	取值
充电效率	0.9	平均行驶速度/(km·h ⁻¹)	40
EB 数量/辆	120	车辆排列间隔系数	1.8
单车占地面积/m ²	36	EB 电池容量/(kW·h)	200
每公里耗电量/(kW·h)	0.5	充电功率最大值/kW	240

表 A2 屋顶光伏发电系统参数
Table A2 Parameters of photovoltaic power generation system

参数	取值	参数	取值
光电转化效率	0.8	1 kW 单片光伏板面积/m ²	5
使用年限/a	25	屋顶光伏建设面积/m ²	30000

表 A3 配电网的分时电价
Table A3 Time-of-use electricity price of distribution network

时段	电价/[元·(kW·h) ⁻¹]
峰 07:30—11:30, 17:00—21:00	0.694
平 11:30—17:00, 21:00—22:00, 05:00—07:30	0.475
谷 22:00 至次日 05:00	0.259

表 A4 公交线路数据
Table A4 Parameters of each bus line

线路	长度/km	EB 数量/辆	平均发车 时间间隔/min	线路	长度/km	EB 数量/辆	平均发车 时间间隔/min
1	30	19	5	5	40	16	10
2	30	19	5	6	40	14	15
3	30	14	10	7	40	12	20
4	30	14	10	8	40	12	20

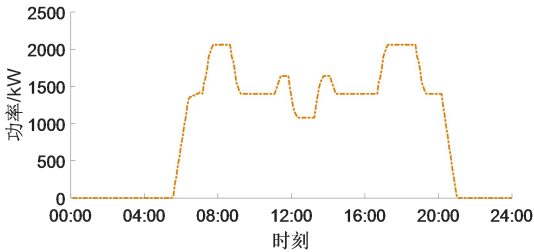


图 A1 EB 总运行负荷时序曲线
Fig.A1 Sequential curve of all EBs' total operation load