

# 考虑充电功率的电动汽车快充站充电设施优化配置

孟旭瑶<sup>1</sup>, 张维戈<sup>1</sup>, 鲍 谚<sup>1</sup>, 黄 梅<sup>1</sup>, 袁瑞铭<sup>2</sup>, 陈 振<sup>3</sup>

(1. 北京交通大学 国家主动能源配电网研发中心, 北京 100044;

2. 国网冀北电力有限公司 电力科学研究院, 北京 100045;

3. 国网北京市电力公司 电力科学研究院, 北京 100076)

**摘要:**为实现电动汽车快充站内的经济建设,同时分析充电功率在充电站规划中的影响,提出了一种电动汽车快充站充电设施优化配置方法。以电动出租车为例,分析其出行特征,并基于排队论分析各个时段内站内排队系统的运行指标,建立分时段的用户等候时间成本计算模型。以充电站投资成本和用户等候时间成本之和最小化为目标函数,建立考虑装置利用率、排队时间、配电容量和占地面积的充电设施配置优化模型,在模型中同时对充电设施的充电功率和数量进行优化,实现快充站内社会成本的最小化。通过算例验证所提方法的可行性以及优化充电功率的经济性。

**关键词:**电动汽车;充电站;排队论;充电功率;充电设施配置

**中图分类号:**U 469.72

**文献标识码:**A

**DOI:**10.16081/j.issn.1006-6047.2018.07.004

## 0 引言

在低碳经济和新能源战略的推动下,电动汽车产业蓬勃发展,同时也带来了电动汽车出行可靠性方面的挑战。除了私人领域“一车一桩”的实现,公共领域的快速充电站建设将成为电动汽车能否摆脱电池容量限制的关键,然而未经规划的充电站内存在装置利用率低、排队等候时间长等问题<sup>[1-2]</sup>。

已有的充电设施配置的研究多数是依据充电站选址的优化结果,划分充电站的服务范围后,基于排队论研究充电设施数量与用户排队时间的关系,建立站内充电设施配置数量的优化模型。在进行充电设施优化配置时,针对不同的优化目标会建立目标函数不同的优化模型,优化目标可大致分为以下3类。

**a.** 以充电站投资成本最小或收益最大为优化目标。如文献[3]基于充电站选址定容方法寻优充电站内所需配置的充电设施的最低数量;文献[4]以建设成本最小和充电设施利用率最大化为目标函数优化站内的充电设施配置数量;文献[5]以充电站收益最大化为目标函数,同时考虑路网和配电网的承载能力,建立充电站规划模型,对充电网络进行规划。

**b.** 以用户的便利性最高或时间成本最小为优化目标。如文献[6]提出了配送效率、行驶可达性、服务可供性等多种充电服务性能评价指标,得到满

足充电服务指标的充电设施配置方案;文献[7]通过数学分布对电动汽车的到站行为进行数学描述,根据建立的排队模型的运行指标进行用户综合满意度分析,对充电设施数量进行优化。

**c.** 以社会成本最小为目标函数,即考虑投资者和充电用户两方面的成本投入。如文献[8]针对电动出租车这一特殊的电动汽车群体,以充电站的投资、运营维护成本以及用户的寻站成本之和最小化为目标函数建立优化模型,得到充电站的最优分布和充电设施的数量配置方案;文献[9]建立以充电站投资成本和用户排队时间成本之和最小化为目标函数的充电设施配置优化模型,并对比了电动出租车快充站内2种不同的排队模型,给出了电动出租车充电站适用的排队模型和充电设施的优化方法。

充电站投资成本和用户等候时间成本都是制约充电站建设的重要因素,可将两者进行加权优化。充电设施配置的约束条件可以归为建站点的土地限制、配电网容量限制、投资方的投资力度和充电用户的排队时间等几个方面。如文献[10]考虑了用户充电需求和充电站投资限额等约束条件;文献[11]提出了用户充电服务质量的约束条件;文献[12]指出了配电网条件对充电设施配置的限制。

目前,已有的研究侧重于对充电设施配置数量的优化,而对于充电设施的功率配置的优化研究近乎空白;但充电设施功率是一个影响充电设施投资成本以及用户排队时间和充电时长的关键变量,因此在优化充电设施数量的同时也应对充电设施功率进行优化。本文以电动出租车为研究对象,分析其全天充电行为特征,基于排队论得到分时段运营的充电站的用户等候时间成本计算方法。以投资成本和用户等候时间成本两者加权成本之和最小为目标函数,考虑排队时间、装置利用率、配电容量和占地

收稿日期:2017-06-08;修回日期:2018-05-07

基金项目:国家重点研发计划(2016YFB0900500);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2016RC029)

Project supported by the National Key R&D Program of China (2016YFB0900500) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2016RC029)

面积等约束条件,建立充电设施配置优化模型。探讨充电设施最优数量和充电功率的配置方法,对充电设施功率优化的必要性进行数学分析,从而实现充电站内充电设施数量和功率的最优配置。

## 1 充电站内排队模型与运行指标

如附录中图 A1 所示,电动汽车进站、排队、充电、离开的整个过程中存在排队现象。用户进站后如果有空闲的充电设施,那么该用户无需排队,直接到该充电车位进行充电;如果用户进站后发现没有空闲的充电设施,则需要排队直至有车辆充电完毕离站。基于此排队过程,本文将采用排队理论研究站内的充电服务系统。

以电动出租车为例,其充电负荷与其行驶特性相关,基于 MATLAB 绘制充电站内电动出租车的典型日充电负荷曲线如附录中图 A2 所示。可见电动出租车 1 d 的充电行为呈现多时段的特性,各个时段可分别视为具有不同到达率的泊松过程<sup>[13-14]</sup>。

在快充站内,受车载电池充电功率的限制,站内应设立多台充电设施并限定充电功率。本文中快充站的服务规则为先到先服务,即在保证充电站排队系统出入平衡的情况下,不考虑等待队列的长度限制。如附录中图 A3 所示,通过对北京市快充站内电动出租车充电时长和充电间隔实际数据的统计分析,可知电动出租车到站充电间隔服从负指数分布,充电时长服从正态分布,其排队系统类属 M/G/k 排队模型<sup>[15-16]</sup>。

结合文献[12,17]对于 M/G/k 排队模型运行指标计算公式的推导过程,设单位时间内到站充电的车辆的数量为  $\lambda$ ,即进站充电的电动汽车的充电间隔为  $1/\lambda$ ; $\mu$  为单位时间内能完成充电的车辆数量,即  $1/\mu$  为充电车辆的充电时长。 $\rho$  表示电动出租车充电站系统中正在接受充电服务的充电车辆的平均数量,其反映了充电站系统繁忙的程度,即:

$$\rho = \lambda / \mu \quad (1)$$

对于有  $s$  个充电桩的充电站服务系统,用  $\rho_s$  表示充电桩的装置利用率为:

$$\rho_s = \rho / s = \lambda / (s\mu) \quad (2)$$

在电动出租车等待制排队模型中,要求电动出租车的平均到达率小于等于充电站的平均服务率,这样才能使系统达到统计平衡,即  $\rho_s \leq 1$ 。装置利用率  $\rho_s$  反映了充电站内充电设施数量  $s$  配置的合理性,装置利用率过低,则说明充电设施配置数量配置过多,充电设施配置的经济性较差。

$$p_0 = \frac{1}{\sum_{n=0}^{s-1} \frac{\rho^n}{n!} + \frac{\rho^s}{s!(1-\rho_s)}} \quad (3)$$

其中, $p_0$  为站内装置空闲率,表示所有充电设施都处于空闲的概率。

$$L_q = \sum_{n=s+1}^{\infty} (n-s)p_n = \frac{p_0 \rho^s \rho_s}{s!(1-\rho_s)^2} \quad (4)$$

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda} \quad (5)$$

$$L_s = L_q + \rho = \frac{p_0 \rho^s \rho_s}{s!(1-\rho_s)^2} + \frac{\lambda}{\mu} \quad (6)$$

$$W_s = \frac{L_s}{\lambda} \quad (7)$$

其中, $L_q$ 、 $W_q$ 、 $L_s$ 、 $W_s$  分别为平均排队长度、平均排队时间、平均等候队长、平均等候时间。平均等候时间  $W_s$  是决定用户等候时间成本的关键性因素。

## 2 充电设施配置优化模型

### 2.1 目标函数

充电桩的数量和充电功率不仅会影响建设者的投资成本,同时也会影响用户的充电服务体验和等候时间,是站内充电设施配置优化模型的 2 个优化因素。以充电站投资成本以及用户等候时间成本之和最小为目标函数建立充电设施配置的优化模型。将成本都归算到单位时间,得到充电设施配置优化模型目标函数为:

$$\min F_k = \gamma_1 F_{sk} + \gamma_2 F_{wk} \quad (8)$$

其中, $F_k$  为快充站  $k$  ( $k=1,2,\dots,m$ ,其中  $m$  为建站点的总数量)的社会成本(元/h); $F_{sk}$  为快充站  $k$  的充电站投资成本(元/h); $F_{wk}$  为快充站  $k$  的用户等候时间成本(元/h); $\gamma_1$  和  $\gamma_2$  为充电站投资成本和用户等候时间成本的权重系数,2 个系数之和为 1。各项成本的具体意义及计算方法介绍如下。

a. 快充站  $k$  的充电站投资成本  $F_{sk}$ ,包括充电站内非充电车位的土地成本、运营成本、照明办公用电的配电成本、充电桩的购买与维护安装成本、充电车位土地成本、充电设施所需配电成本。

$$F_{sk} = \frac{d(1+d)^r}{(1+d)^r - 1} \left( \frac{C_{td} + C_{yu} + C_{zm} + C_{gm} + C_{wa} + C_{cw} + C_{pd}}{365 \times 24} + \frac{C_{sk}}{365 \times 24} s_k \right) \quad (9)$$

$$C_{zm} = \frac{S_e \alpha}{\beta}, C_{pd} = \frac{P\alpha}{\beta \cos \varphi} \quad (10)$$

其中, $r$  为充电站的运营年限(a); $d$  为贴现率; $C_{td}$  为充电站内非充电车位土地的成本(元); $C_{yu}$  为充电站内运营成本(元); $C_{zm}$  为充电站内照明办公用电的配电成本(元); $C_{gm}$  为单个充电设施的购买成本(元); $C_{wa}$  为单个充电设施的维护安装成本(元); $C_{cw}$  为单个充电车位的土地成本(元); $C_{pd}$  为单个充电设施的配电成本(元); $s_k$  为快充站  $k$  内充电设施数量

(个);  $S_e$  为充电站内照明办公用电总容量 ( $\text{kV}\cdot\text{A}$ );  $\alpha$  为单位配电容量的配电成本 (元/ $\text{kV}\cdot\text{A}$ );  $\beta$  为充电站内变压器最佳负载率;  $P$  为单个充电设施功率 ( $\text{kW}$ );  $\cos \varphi$  为充电设施的功率因数。

需要注意的是,  $P$  为充电设施的功率, 即充电设施的充电功率;  $P/(\beta \cos \varphi)$  为充电设施的配电功率;  $P\eta$  为电动汽车的充电功率, 其中  $\eta$  为充电设施的工作效率。

**b.** 快充站  $k$  的用户等候时间成本  $F_{wk}$ 。结合快充站内充电负荷分时段的情况, 分别计算各时段的用户等候时间后再加权求取该充电站内单位时间的用户等候时间成本。建立分时段运营充电站的用户等候时间成本计算模型为:

$$F_{wk} = C_w \left\{ \sum_{i=1}^n [(W_{qki} + \bar{\tau}) H_{ki}] / \sum_{i=1}^n T_{ki} \right\} \quad (11)$$

其中,  $C_w$  为电动出租车司机的平均出行时间成本 (元/h), 可根据出租车司机的月收入 and 月工作时间折合求得;  $W_{qki}$  为快充站  $k$  内时段  $i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 的排队时间 (h);  $\bar{\tau}$  为电动出租车的平均充电时长 (h), 可根据电动出租车的电池容量  $S_E$  和充电需求  $S_{OCch}$  进行计算;  $H_{ki}$  为快充站  $k$  内在运营时段  $i$  到站充电的电动出租车车次 (辆);  $T_{ki}$  为快充站  $k$  内运营时段  $i$  的时间长度 (h)。

## 2.2 约束条件

对于充电站  $k$ , 在固定的运营时段  $T_{ki}$  内, 到站充电的  $H_{ki}$  辆车的总充电需求占这段时间内站内  $s_k$  个充电设施的输入电能的比例, 即为该时段充电站内的负载率  $p_{ut}(ki)$ 。

$$p_{ut}(ki) = \frac{H_{ki} S_E S_{OCch}}{P s_k T_{ki}} \quad (12)$$

在满足同样的负荷需求的情况下, 负载率越大, 站内负荷曲线的峰谷差越小; 而配电容量需要满足最大的负荷, 负载率的提升有利于降低站内的配电容量和配电成本。易证明得到负载率等于装置利用率, 即:

$$\rho_s(ki) = \frac{\lambda_{ki}}{s_k \mu} = \frac{H_{ki}/T_{ki}}{\frac{P}{s_k S_E S_{OCch}}} = \frac{H_{ki} S_E S_{OCch}}{P s_k T_{ki}} = p_{ut}(ki) \quad (13)$$

其中,  $\rho_s(ki)$  为快充站  $k$  内运营时段  $i$  的充电设施的装置利用率。

因此, 装置利用率除了反映充电设施配置的经济性外, 还决定了充电站的配电经济性, 需对站内的装置利用率做出限制以保证充电站配置的经济性。此外需要从用户角度, 考虑用户可以忍受的排队时间。

$$p_{ki} \geq p_t \quad (14)$$

$$W_{qki} \leq W_t \quad (15)$$

其中,  $p_{ki}$  为快充站  $k$  内时段  $i$  的装置利用率;  $p_t$  为装置利用率的最低限定值;  $W_{qki}$  为快充站  $k$  内时段  $i$  的排队时间 (h);  $W_t$  为用户可以容忍的最大排队时间 (h)。

快速充电站是一个占地面积、配电容量一定的, 可供电动汽车方便快捷地进行应急充电的充电场所。进行站内充电设施配置时应考虑建站点的配电容量和占地面积的限制条件, 本文将占地面积限制条件转化为站内可以安装的充电设施数量上限值。

$$S_{Nk} \leq S_{tk}, S_{Nk} = \left( \frac{s_k K_k P}{\cos \varphi} + S_e \right) / \beta \quad (16)$$

$$s_k \leq s_{tk} \quad (17)$$

其中,  $S_{Nk}$ 、 $S_{tk}$  分别为快充站  $k$  的配电容量 ( $\text{MV}\cdot\text{A}$ )、配电容量上限值 ( $\text{MV}\cdot\text{A}$ );  $K_k$  为站内充电设施的同时工作系数;  $s_k$ 、 $s_{tk}$  分别为快充站  $k$  内的充电设施数量、可安装的充电设施数量上限值。

综上可得, 充电设施配置优化模型为:

$$\begin{cases} \min F_k = \min \gamma_1 F_{sk} + \gamma_2 F_{wk} \\ \text{s.t. } W_{qki} \leq W_t, p_{ki} \geq p_t, S_{Nk} \leq S_{tk}, s_k \leq s_{tk} \end{cases} \quad (18)$$

## 3 站内充电设施配置

### 3.1 站内充电设施功率配置

相同的参数条件下, 选用不同功率的充电设施, 得到的站内充电设施配置数量将会有很大差异。图 1 为快充站  $k$  内社会成本  $F_k$  随充电设施数量和功率变化的关系图。绘图数据来源于第 2 节中站内充电设施配置优化模型的仿真过程。

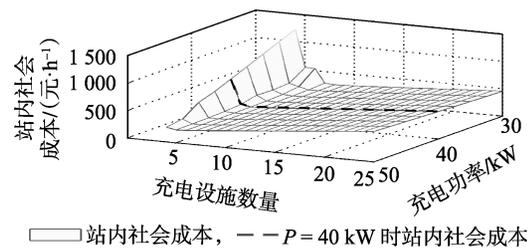


图 1 社会成本与充电设施数量及充电功率关系图

Fig.1 Social cost vs. charging facilities' number and charging power

由图 1 可知,  $F_k$  是随充电桩的数量  $s_k$  和充电功率  $P$  变化的二元函数, 则站内设施配置模型的目标函数可表示为  $\min F_k = f(s_k, P)$ , 如果只优化充电设施的数量, 得到的将是  $\min F_k$  的局部最优值。如图 1 中虚线所示, 假设固定站内充电设施功率为 40 kW, 得到的将是  $P=40$  kW 所在截面的最优值, 并不是问题的全局最优值。因此在进行站内设施配置时, 应同时优化充电设施的功率和数量。

根据式 (19)、(20) 可得, 充电站投资成本  $F_{sk}$  随

着充电桩数量和功率的增加而增加,而用户等候时间成本  $F_{wk}$  随着充电桩数量和功率的增加而降低。图 2、3 分别为充电站投资成本、用户等候时间成本随充电桩数量和功率变化的趋势图,符合上述分析。

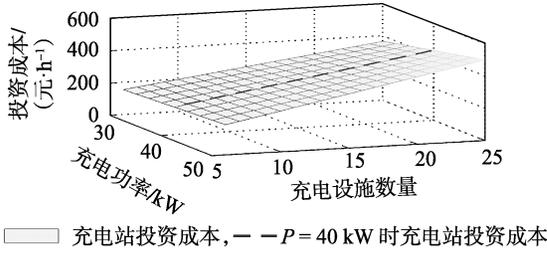


图 2 投资成本与充电设施数量及充电功率关系图  
Fig.2 Investment cost vs. charging facilities' number and charging power

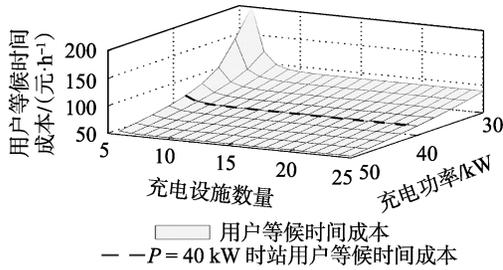


图 3 用户等候时间成本与充电设施数量及充电功率关系图  
Fig.3 Users' waiting time cost vs. charging facilities' number and charging power

根据图 1 中站内社会成本的变化趋势可得,在充电需求一定时,大功率充电设施对应的曲线会优先到达成本最低点。这可通过求数学梯度进行验证,如式(21)所示,充电设施功率  $P$  越大,  $F_k$  对  $s_k$  的一阶偏导数越大,其到达最低点的速度越快。因此,目标函数  $\min F_k$  的最优点在“大功率”侧,在进行站内充电设施配置时,优化结果会在满足约束条件的范围内尽可能地选用大功率充电设施。

$$F_k = \gamma_1 F_{sk} + \gamma_2 F_{wk} = \gamma_1 \frac{d(1+d)^r}{(1+d)^r - 1} \left( \frac{C_{td} + C_{yu} + C_{zm}}{365 \times 24} + \frac{C_{gm} + C_{wa} + C_{cw} + \frac{Pa}{\beta \cos \varphi}}{365 \times 24} s_k \right) + C_w \gamma_2 \left\{ \sum_{i=1}^n [(W_{qki} + \bar{\tau}) H_{ki}] / \sum_{i=1}^n T_{ki} \right\} = (c_1 + c_2 P) s_k + \frac{c_3}{P} + \frac{c_4}{s_k^k P} + c_5 \quad (19)$$

$$c_1 = \gamma_1 \frac{d(1+d)^r}{(1+d)^r - 1} \frac{C_{gm} + C_{wa} + C_{cw}}{365 \times 24}$$

$$c_2 = \gamma_1 \frac{d(1+d)^r}{(1+d)^r - 1} \frac{a}{365 \times 24 \beta \cos \varphi}$$

$$c_3 = C_w \gamma_2 \frac{P_0 \rho^s \rho_s}{s! (1-\rho_s)^2}$$

$$c_4 = C_w \gamma_2 \lambda T$$

$$c_5 = \gamma_1 \frac{d(1+d)^r}{(1+d)^r - 1} \frac{C_{td} + C_{yu} + C_{zm}}{365 \times 24} \quad (20)$$

$$\frac{\partial F_k}{\partial s_k} = \frac{\partial \left[ (c_1 + c_2 P) s_k + \frac{c_3}{P} + \frac{c_4}{s_k^k P} + c_5 \right]}{\partial s_k} = c_1 + c_2 P - \frac{c_4}{P} \frac{1 + \ln s_k}{s_k^k} \quad (21)$$

### 3.2 权重取值范围

充电站建设过程中,考虑的因素不同,权重的取值范围会有所不同。

a. 在充电站的占地面积严格受限时,权重的取值建议为  $\gamma_1 > \gamma_2$ ,使得  $\min F_k = f(s_k, P)$  的优化结果偏向于选择更低功率的充电设施满足现有的充电需求。

b. 在城市电动汽车发展较快的情况下,用户等候时间成本  $F_{wk}$  随到站充电车辆  $H_{ki}$  的增加会迅速增加,为减少后期充电站的扩建工程量,权重取值建议为  $\gamma_1 < \gamma_2$ ,使得  $\min F_k = f(s_k, P)$  的优化结果偏向于选择更高功率的充电设施来尽可能降低用户等候时间成本,以满足充电需求的发展。

## 4 案例分析

以 2022 年冬奥会延庆冬奥专区示范充电站为例进行站内充电设施配置案例分析。另外考虑到参数取值对于充电设施最优配置点的影响,分别计算成本权重参数  $[\gamma_1, \gamma_2]$  为  $[0, 1]$ 、 $[0.5, 0.5]$  和  $[1, 0]$  时的充电设施配置情况,对比 3 种情况下充电设施的最优配置结果并进行分析。

### 4.1 站内充电设施配置参数

根据延庆冬奥专区示范充电站的建站规划,冬奥专区用地均为免费征用,因此充电站内非充电车位的土地成本  $C_{td}$  和单个车位成本  $C_{cw}$  均取为 0,其他站内充电设施配置优化模型的参数如下:充电站的运营年限  $r = 10$  a, 贴现率  $d = 5\%$ ,运营成本为  $2.1 \times 10^5$  元,充电设施购买费用为  $1.1 \times 10^3$  元/kW,设施安装维护费用取购买成本的 1.5%;照明办公总的容量  $S_e = 150$  kV·A,配电成本  $\alpha = 5 \times 10^3$  元/(kV·A),变压器负载率  $\beta = 0.35$ ,功率因数  $\cos \varphi = 0.99$ ,充电站内配电容量限制  $S_l = 1.6$  MV·A,占地面积限制  $s_l = 15$ ,据北京出租车司机的月收入 and 月工作时间,折合得电动出租车司机的平均出行时间成本  $C_w = 16$  元/h<sup>[18]</sup>。

充电站内电动出租车的到站时间段可以划分如下:时段 1 为 00:00—09:00,时段 2 为 09:00—15:00,时段 3 为 15:00—20:00,时段 4 为 20:00—24:00。初步预估充电站内 4 个时段的充电车次分别

为 72、56、48、32 辆。

考虑电池的承受能力,确定充电功率的优化范围为 20~60 kW,优化梯度为 10 kW。取用户可容忍的最大排队等候时间  $W_1 = 10 \text{ min} \approx 0.17 \text{ h}$ ,装置利用率最低限定值  $p_1 = 0.5$ 。

#### 4.2 配置结果与分析

分别取成本权重参数  $[\gamma_1, \gamma_2]$  为  $[0, 1]$ 、 $[0.5, 0.5]$  和  $[1, 0]$ ,采用式 (18) 对该站进行充电设施优化配置,得到 3 种情况下的站内最优配置参数如表 1 所示。

经过优化,  $[\gamma_1, \gamma_2]$  取  $[0, 1]$  或  $[0.5, 0.5]$  时,该站需要配置的充电设施数量为 8 个,充电设施最优配置功率为 50 kW,配电容量 1.58 MV·A;充电站内 4 个工作时段的装置利用率均达到 0.63 以上,配电经济性高。 $[\gamma_1, \gamma_2]$  取  $[1, 0]$  时,该站需要配置的充电设施数量为 13 个,充电设施最优配置功率为 30 kW,配电容量 1.55 MV·A;充电站内 4 个工作时段的装置利用率均达到 0.64 以上,配电经济性高。

在求解过程中,30~50 kW 的充电设施的最优数量以及对应的其他参数如表 2 所示。可见 20 kW 和 60 kW 的充电设施在求解问题时无解,原因是为了维持站内充电服务系统的输入输出平衡,必须保证装置利用率小于等于 1,即  $\rho_s \leq 1$ 。对于不同功率的充电设施,站内设施配置的最低数量也会不同,功率越低的充电设施服务时间越长,为了维持系统稳定所需配置的最低设施数量也就越大,因此小功率的充电设施容易不满足占地面积约束条件。同时大功率充电设施则由于其高充电功率而容易不满足配电容量约束条件。在本案例中,20 kW 的充电设施在满足排队时间和装置利用率这 2 个基本约束条件情况下的充电设施最低配置数量为  $16 > s_1 (s_1 = 15)$ ,60 kW 的充电设施在满足排队时间和装置利用率这 2 个基本约束条件情况下的最低配电容量为 1.63

MV·A  $> S_1 (S_1 = 1.6 \text{ MV} \cdot \text{A})$ ,故这 2 种情况下问题无解。

图 4 和表 2 分别为该充电站内充电设施功率优化过程中各项站内成本、站内指标的对比,其中图 4 中的站内社会成本的权重取值为  $[\gamma_1, \gamma_2] = [0.5, 0.5]$ 。由图 4 和表 2 的对比可知,在满足约束条件的情况下,采用大功率的充电设施可以减小充电站的设施配置数量以及用户在站内的排队时间和等候时间,从而减少用户等候时间成本和充电站内社会成本。

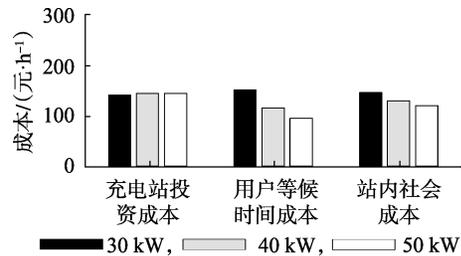


图 4 不同功率充电设施最优方案的各项成本对比

Fig.4 Cost comparison of charging facilities with different power in optimal configuration

表 1 中,当  $[\gamma_1, \gamma_2]$  取  $[0, 1]$  或  $[0.5, 0.5]$  时,优化结果均倾向于选择大功率充电设施;当  $[\gamma_1, \gamma_2]$  取  $[1, 0]$  时,优化结果倾向于选择小功率充电设施。可以通过表 2 对此现象进行解释,在相应功率的最优配置点,虽然小功率充电设施在装置利用率和排队时间上均优于大功率充电设施,但是其充电时间大幅延长,导致充电用户的等候时间和等候时间成本大幅增加,因此在成本权重偏向于用户方时,优化结果会倾向于选择大功率充电设施;相反地,在成本权重偏向于投资方时,优化结果会倾向于选择小功率充电设施。

在此案例分析过程中,发现当  $[\gamma_1, \gamma_2]$  的取值在  $[0.1, 0.9]$  至  $[0.9, 0.1]$  之间变化时,优化结果均选择 50 kW 充电设施,这是由于此案例中土地成本为 0,

表 1 最优建站方案与站内配置参数

Table 1 Optimal siting and sizing parameters of charging stations

$[\gamma_1, \gamma_2]$	充电设施数量	充电设施功率/kW	配电容量/(MV·A)	装置利用率				排队时间/min				充电站投资成本/(元·h <sup>-1</sup> )	等候时间成本/(元·h <sup>-1</sup> )	站内社会成本(加权后)/(元·h <sup>-1</sup> )
				时段 1	时段 2	时段 3	时段 4	时段 1	时段 2	时段 3	时段 4			
$[0, 1]$	8	50	1.58	0.63	0.73	0.75	0.63	2.11	5.57	6.76	2.11	144.98	96.28	120.63
$[0.5, 0.5]$	8	50	1.58	0.63	0.73	0.75	0.63	2.11	5.57	6.76	2.11	144.98	96.28	120.63
$[1, 0]$	13	30	1.55	0.64	0.75	0.77	0.64	1.33	4.72	6.01	1.33	142.66	152.30	142.66

表 2 不同功率充电设施最优方案的配置指标对比

Table 2 Operational indexes comparison of charging facilities with different power in optimal configuration

充电设施功率/kW	充电设施数量	配电容量/(MV·A)	装置利用率				排队时间/min				等候时间/min			
			时段 1	时段 2	时段 3	时段 4	时段 1	时段 2	时段 3	时段 4	时段 1	时段 2	时段 3	时段 4
30	13	1.55	0.64	0.75	0.77	0.64	1.33	4.72	6.01	1.33	63.91	67.29	68.59	63.91
40	10	1.58	0.63	0.73	0.75	0.63	1.58	4.70	5.81	1.58	48.52	51.64	52.74	48.52
50	8	1.58	0.63	0.73	0.75	0.63	2.11	5.57	6.76	2.11	39.65	43.12	44.30	39.65

因此投资成本仅仅由充电设施及相应配电设施的购买维护成本构成,导致充电站投资成本随充电设施数量或充电功率的变化不明显,用户方成本占据了主导地位。

## 5 结论

本文以电动出租车为研究对象,以充电投资成本和用户等候时间成本之和最小为优化目标,建立了考虑装置利用率、用户排队时间、配电容量、占地面积等约束条件的充电设施配置优化模型,基于最优化思维分析充电功率优化的必要性。以延庆冬奥专区示范充电站为优化配置对象,设计符合当前电动出租车充电需求的站内充电设施配置方案,得到该站充电设施的最优配置数量和充电功率。同时验证了在满足约束条件的情况下,对充电设施功率进行优化配置可以有效减少充电设施的安装数量,降低充电站投资成本和用户等候时间成本,证明了大功率充电设施的经济性。后期将基于本文的分析,进行区域级充电站的选址定容规划,研究总规划成本最小化及各站充电设施配置最优化的充电网络规划方案。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [ 1 ] 肖湘宁,温剑锋,陶顺,等. 电动汽车充电基础设施规划中若干关键问题的研究与建议[J]. 电工技术学报,2014,29(8):1-10.  
XIAO Xiangning, WEN Jianfeng, TAO Shun, et al. Study and recommendations of the key issues in planning of electric vehicles' charging facilities[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 1-10.
- [ 2 ] LU X C, CHEN Q B, ZHANG Z J. The electric vehicle routing optimizing algorithm and the charging stations' layout analysis in Beijing [J]. International Journal of Simulation Modelling, 2014, 13(1): 116-127.
- [ 3 ] 赵书强,李志伟,党磊. 基于城市交通网络信息的电动汽车充电站最优选址和定容[J]. 电力自动化设备,2016,36(10):8-15.  
ZHAO Shuqiang, LI Zhiwei, DANG Lei. Optimal EV charging station siting and sizing based on urban traffic network information [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(10): 8-15.
- [ 4 ] 陈静鹏,艾芊,肖斐. 基于用户出行需求的电动汽车充电站规划[J]. 电力自动化设备,2016,36(6):34-39.  
CHEN Jingpeng, AI Qian, XIAO Fei. EV charging station planning based on travel demand[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 34-39.
- [ 5 ] 刘畅,刘洪,李香龙,等. 考虑路网与配电网可靠性的电动汽车充电站多目标规划[J]. 电力自动化设备,2017,37(8):28-34.  
LIU Chang, LIU Hong, LI Xianglong, et al. Multi-objective EV charging station planning with consideration of road network reliability and distribution network reliability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 28-34.
- [ 6 ] 赵胜霞,刘俊勇,向月,等. 考虑配电网接纳能力的电动汽车充换电服务网基础设施配置方案分析与评估[J]. 电力自动化设备,2016,36(6):94-101.  
ZHAO Shengxia, LIU Junyong, XIANG Yue, et al. Analysis and assessment considering accommodation capability of distribution network for infrastructure deployment of EV charging/swapping service network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 94-101.
- [ 7 ] 李如琦,苏浩益. 基于排队论的电动汽车充电设施优化配置[J]. 电力系统自动化,2011,35(14):58-61.  
LI Ruqi, SU Haoyi. Optimal allocation of charging facilities for electric vehicles based on queuing theory [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 58-61.
- [ 8 ] 葛少云,李荣,韩俊,等. 考虑电动出租车随机概率行为特性的充电站规划[J]. 电力系统自动化,2016,40(4):50-58.  
GE Shaoyun, LI Rong, HAN Jun, et al. Charging station planning considering probability behavior characteristic of electric taxi [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(4): 50-58.
- [ 9 ] 张帝,姜久春,张维戈,等. 电动出租车充电桩优化配置[J]. 电工技术学报,2015,30(18):181-188.  
ZHANG Di, JIANG Jiuchun, ZHANG Weige, et al. Optimal configuration of charging spots for electric taxis [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(18): 181-188.
- [ 10 ] 舒隽,唐刚,韩冰. 电动汽车充电站最优规划的两阶段方法[J]. 电工技术学报,2017,32(3):10-17.  
SHU Jun, TANG Gang, HAN Bing. Two-stage method for optimal planning of electric vehicle charging station [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(3): 10-17.
- [ 11 ] DAVIDOV S, PANTOŠ M. Planning of electric vehicle infrastructure based on charging reliability and quality of service [J]. Energy, 2017, 118: 1156-1167.
- [ 12 ] XIANG Y, LIU J, LI R, et al. Economic planning of electric vehicle charging stations considering traffic constraints and load profile templates [J]. Applied Energy, 2016, 178: 647-659.
- [ 13 ] 郭建龙,文福拴. 考虑削峰填谷的电动出租车充电负荷影响因素调节方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(8):242-248.  
GUO Jianlong, WEN Fushuan. Methods of influencing factor regulation considering load shifting for electric taxis charging load [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 242-248.
- [ 14 ] 李亚芬,黄梅,张维戈. 电动出租车日充电负荷估算方法[J]. 电力系统自动化,2014,38(10):55-60.  
LI Yafen, HUANG Mei, ZHANG Weige. An estimation method for daily charging load of electric taxis [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(10): 55-60.
- [ 15 ] 张维戈,陈连福,黄彧,等. M/G/k 排队模型在电动出租汽车充电站排队系统中的应用[J]. 电网技术,2015,39(3):724-729.  
ZHANG Weige, CHEN Lianfu, HUANG Yu, et al. Application of M/G/k queuing model in queuing system of electric taxi charging station [J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 724-729.
- [ 16 ] FAN P, SAINBAYAR B, REN S. Operation analysis of fast charging stations with energy demand control of electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(4): 1819-1826.
- [ 17 ] ZENGİNİS I, VARDAKAS J S, ZORBA N, et al. Analysis and quality of service evaluation of a fast charging station for electric vehicles [J]. Energy, 2016, 112: 669-678.
- [ 18 ] 石孟磊. 北京社会心态分析报告(2013~2014) [M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2014: 308-322.

## 作者简介:



孟旭瑶

孟旭瑶(1995—),女,安徽定远人,硕士研究生,主要研究方向为新能源、充电站规划(E-mail:16121501@bjtu.edu.cn);

张维戈(1971—),男,内蒙古包头人,教授,博士,主要研究方向为电池管理技术和充电设施应用(E-mail:wgzhang@bjtu.

edu.cn);

鲍 谚(1982—),男,山西大同人,讲师,博士,主要研究方向为电动汽车与电网互动技术、智能电网与新能源发展技术;

黄 梅(1959—),女,内蒙古呼和浩特人,教授,硕士,主要研究方向为电动汽车充电站建模与充电站相互影响分析、电力系统建模仿真与控制。

### Optimal configuration of charging facility for electric vehicle fast charging station considering charging power

MENG Xuyao<sup>1</sup>, ZHANG Weige<sup>1</sup>, BAO Yan<sup>1</sup>, HUANG Mei<sup>1</sup>, YUAN Ruiming<sup>2</sup>, CHEN Zhen<sup>3</sup>

(1. National Active Distribution Network Technology Research Center, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Power Research Institute, State Grid Jibei Electric Power Company Limited, Beijing 100045, China;

3. State Grid Beijing Electric Power Research Institute, Beijing 100076, China)

**Abstract:** In order to realize the economic construction of electric vehicle fast charging station and analyze the impact of the charging power on the charging station planning, an approach to optimize the charging facilities of electric vehicle fast charging station is proposed. Taking the electric taxi as an example, the travel characteristics of the electric taxis are analyzed, and the operational indexes of the queuing system in each time period are analyzed based on the queuing theory. Subsequently, the waiting time cost calculation model of users is established. With minimum sum of the investment cost and the waiting time cost as the objective function and considering the utilization rate of facilities, queuing time, distribution capacity and floor area, the optimization model of charging facilities in charging station is established. The number and charging power of charging facilities are optimized simultaneously to achieve minimum in-station social cost. The feasibility of the proposed approach and the economy of charging power optimization are verified by a case study.

**Key words:** electric vehicles; charging station; queuing theory; charging power; charging facility configuration

(上接第 27 页 continued from page 27)

### Comprehensive evaluation of commercial operation mode for electric vehicle charging based on value-chain analysis

ZENG Bo<sup>1</sup>, BAI Jingmeng<sup>1</sup>, ZHANG Yuying<sup>2</sup>, SUN Ende<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Shenhua Guohua (Beijing) Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100025, China;

3. State Grid Qingdao Power Supply Company, Qingdao 266000, China)

**Abstract:** A comprehensive evaluation model of EV (Electric Vehicle) charging commercial operation benefit is proposed. Based on the theory of value-chain, the internal and external value-chain and the construction principle of index system for EV charging commercial operation project are analyzed. A comprehensive evaluation index system is proposed, which includes the benefit of government, investment operator and user of EV charging commercial operation modes. Special attention is paid on the aging characteristics and the value-added links of internal and external value-chain of the commercial operation modes. On this basis, a real-time combined weighting-matter element extension comprehensive evaluation model is further proposed according to the index characteristics. Consequently, quantitative comprehensive benefit evaluation of EV charging commercial operation modes can be achieved. Different from traditional deterministic evaluation approaches, the proposed method considers the aging characteristics and the uncertainty in EV charging market, and introduces an approach that combines the expert real-time scoring and the entropy weight. In this way, the proposed model can achieve a reasonable balance between the information value of attributes and the subjective experiences, and improve the robustness and discrimination ability in practical applications.

**Key words:** electric vehicles; charging service; value-chain; commercial operation modes; comprehensive evaluation index system; matter element extension model

# 附录

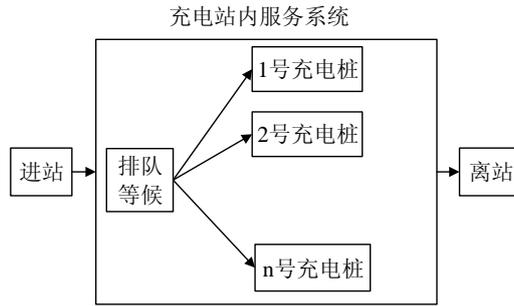


图 A1 充电站内排队过程

Fig.A1 Queuing process in charging station

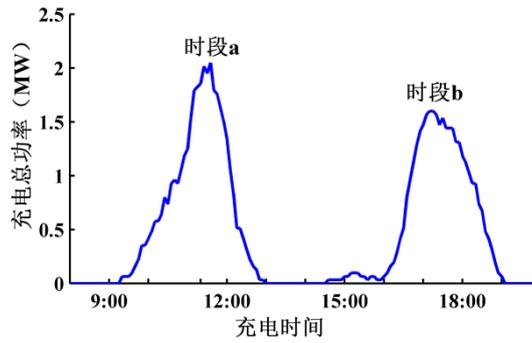


图 A2 电动出租车充电站典型日充电负荷曲线

Fig.A2 Typical daily charging load curve of electric taxi in charging station

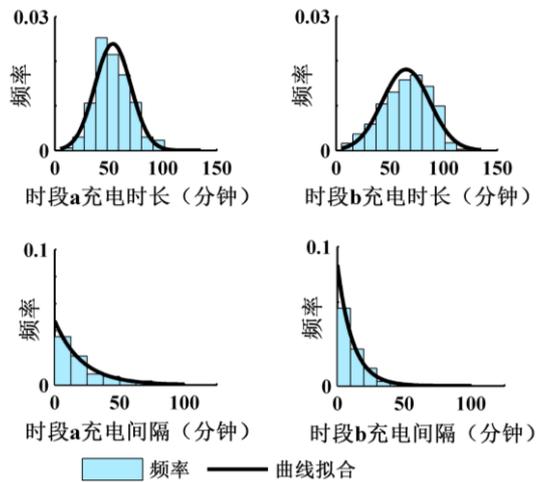


图 A3 电动出租车充电时长与充电间隔统计规律

Fig.A3 Statistical distribution of electric taxi charging duration and charging interval