

考虑电量分布及行驶里程的高速公路充电站规划

葛少云,冯 亮,刘 洪,王 龙

(天津大学 智能电网教育部重点实验室,天津 300072)

摘要: 针对高速公路的车流情况和充电需求特点,构建了高速公路充电站的规划模型。该模型考虑了电动汽车的电量分布和行驶里程的影响,以高速公路中到充电站充电的电动汽车的数量期望值最大化为目标来进行充电站的站址选择,以充电站的服务成本和顾客的等待费用之和最小为目标来优化配置充电站的充电机台数,并利用排队论原理分析了充电站的服务水平和运行效率。最后通过算例验证了该规划模型的可行性和有效性。

关键词: 电动汽车; 充电站规划; 电量分布; 行驶里程; 排队论

中图分类号: U 469.72

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.07.019

0 引言

目前,环境和能源问题日益突出,节能与环保也成为世界各国所追求的发展模式^[1-2]。高污染和高耗能的缺点使得传统燃油汽车的发展受到了极大的限制,而电动汽车的出现却给未来的汽车行业提供了一个长远发展的解决方案^[3-4]。

电动汽车的相关技术已成为国内外众多学者的研究热点,而作为电动汽车推广应用的前提和基础,充电设施的规划和建设也逐步引起人们的重视^[5]。文献[6-7]分析了大量电动汽车的充电行为对电网所带来的影响。文献[8-9]研究了对电动汽车充电行为的优化调度与控制问题。文献[10-11]研究了电动汽车的充电需求和负荷特性,并提出了相应的计算方法。文献[12]介绍了我国电动汽车充电站的发展现状,提出了影响电动汽车充电站规划的因素和所需遵循的原则。文献[13]以居民负荷的分布情况

模拟电动汽车的数量,以投运至目标年最大化充电站运营收益作为目标来进行充电站的选址规划。文献[14]根据电动公交客车的运行机制和动力电池的功率变化特性构建了电动公交客车充电站的容量需求预测模型,建立了定功率工况下的充电机制。文献[15]将电动汽车充电设施规划划分为示范阶段、公益阶段和商业运营阶段,并根据每个阶段的特点提出了充电方式的选择优化模型以及充电设施规划的原则、流程和模型。文献[16]提出了电动汽车充电站规划的两阶段模型,第一阶段利用聚类分析法将区域的路况信息转化为充电需求集群,第二阶段在考虑一定的约束和资金因素等条件下,利用优化算法进行电动汽车充电站的优化选址。文献[17]运用动态交通网络思想建立了基于硬时间窗约束下的充电站布局及确定最佳规模的多目标优化模型,并提出了求解该模型的两阶段启发式算法。文献[18]以包含充电站配电网投资与运行成本最小为目标,建立了考虑充电站布局优化的配电网规划模型。文献[19]对具有反向放电能力的电动汽车充电站的入网方案进行了分析,总结了各种典型方案的优缺点及其适用范围。

收稿日期:2012-06-18;修回日期:2013-05-16

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2009-CB219700)

Project supported by the National Basic Research Program of China(973 Program)(2009CB219700)

Plug-and-play technology applied in microgrid and utility grid

HUO Qunhai,TANG Xisheng

(Institute of Electrical Engineering,Chinese Academy of Sciences,Beijing 100190,China)

Abstract: A microgrid networking strategy is adopted,which controls the master microsource to maintain the voltage and frequency of microgrid and the slave microsource to operate in the maximum power point tracking mode. The plug-and-play technology is then proposed,which can be used to realize the smooth connection or disconnection of the master microsource with the grid for the energy exchange between microgrid and utility grid while maintain the stable voltage for the sensitive loads in microgrid. The realization processes of microgrid plug-and-play are analyzed,simulated and experimentally studied in detail, which shows that,the plug-and-play technology of microgrid is correct and feasible,its hardware implementation is easy and it has less impact on local sensitive load.

Key words: plug-and-play; grid-connection; networking; microsource; microgrid; electric filters

$$\begin{cases} \mu P_1 = \lambda P_0 \\ (n+1)\mu P_{n+1} + \lambda P_{n-1} = (\eta\mu + \lambda)P_n & 1 \leq n \leq c \\ c\mu P_{n+1} + \lambda P_{n-1} = (c\mu + \lambda)P_n & n > c \end{cases} \quad (6)$$

其中, P_n 为有 n 辆电动汽车接受充电服务的概率, 且 $\sum_{n=0}^{\infty} P_n = 1$ 。

利用递推法求解式(6)所示的差分方程, 可得电动汽车充电服务的概率为:

$$P_0 = \left[\sum_{k=0}^{c-1} \frac{1}{k!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^k + \frac{1}{c!} \frac{1}{1-\rho} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^c \right]^{-1}$$

$$P_n = \begin{cases} \frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^n P_0 & n \leq c \\ \frac{1}{c! c^{n-c}} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^n P_0 & n > c \end{cases} \quad (7)$$

由此可得充电站排队服务系统的运行指标如下。充电站的平均排队长度 L_q 为:

$$L_q = \sum_{n=c+1}^{\infty} (n-c)P_n = \frac{(c\rho)^c \rho}{c!(1-\rho)^2} P_0 \quad (8)$$

充电站的平均队长 L_s 为:

$$L_s = L_q + \frac{\lambda}{\mu} = \frac{(c\rho)^c \rho}{c!(1-\rho)^2} P_0 + \frac{\lambda}{\mu} \quad (9)$$

顾客在队列中的平均等待时间 W_q 为:

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda} = \frac{(c\rho)^c \rho}{c!(1-\rho)^2 \lambda} P_0 \quad (10)$$

顾客在充电站的平均逗留时间 W_s 为:

$$W_s = \frac{L_s}{\lambda} = \frac{(c\rho)^c \rho}{c!(1-\rho)^2 \lambda} P_0 + \frac{1}{\mu} \quad (11)$$

充电机的空闲比例 I_0 为:

$$I_0 = 1 - \rho = 1 - \frac{\lambda}{c\mu} \quad (12)$$

2.2 充电机的优化配置

对于充电站而言, 若充电机配置较多, 则充电站的服务成本会增加, 服务水平会有所提高, 顾客在充电站中由于等待所花费的成本会降低; 相反, 若充电机配置较少, 充电站的服务成本会减少, 服务水平会降低, 而顾客在充电站中由于等待所花费的成本会增加。所以, 本文兼顾了充电站与顾客双方的利益, 以充电站的服务成本和顾客的等待费用之和最小为目标来优化配置充电站的充电机台数。

在稳态的情况下, 设单位时间内每个充电机的成本费用是 c_s , 每个顾客在充电站停留单位时间的费用为 c_w , 则单位时间内的费用(服务成本和等待费用之和)的期望值为:

$$z = c_s c + c_w L_s \quad (13)$$

其中, L_s 是 c 的函数, 因此, 系统的总费用 $z = z(c)$ 是关于 c 的函数, 记 c^* 为充电机的最优配置台数, 则 $z(c^*)$ 即为最小费用, 由于 c 只能取整数, $z(c)$ 是离散函数, 所以采用边际分析法求解, 则有:

$$\begin{cases} z(c^*) \leq z(c^* - 1) \\ z(c^*) \leq z(c^* + 1) \end{cases} \quad (14)$$

将式(13)代入式(14), 可得:

$$\begin{cases} c_s c^* + c_w L_s(c^*) \leq c_s(c^* - 1) + c_w L_s(c^* - 1) \\ c_s c^* + c_w L_s(c^*) \leq c_s(c^* + 1) + c_w L_s(c^* + 1) \end{cases} \quad (15)$$

化简整理, 可得:

$$L_s(c^*) - L_s(c^* + 1) \leq \frac{c_s}{c_w} \leq L_s(c^* - 1) - L_s(c^*) \quad (16)$$

由式(16)即可求得充电站的最优充电机配置台数 c^* 。

3 算例分析

3.1 基础数据

假设某一高速路段如图 3 所示。该路段各路口位置可表示为 $A = [0, 24, 54, 104, 120]$ (单位为 km), 高速路段及各路口典型日的车流量可表示为 $Q = [14808, 1398, 570, -2748, -14028]$ (单位为辆), 到规划目标年, 预计电动汽车所占车辆比例为 15%, 最大行驶里程为 120 km, 电量警戒值为 30%。

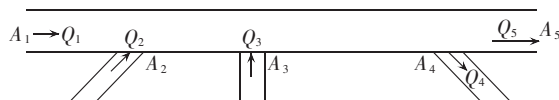


图 3 规划路段示意图

Fig.3 Schematic diagram of trunk road

假设进入该路段的电动汽车的电量分布满足参数为 $\tau=0.5$ 、 $\sigma=0.204$ 的正态分布, 则其概率密度函数为:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-(x-\tau)^2/(2\sigma^2)} \quad (17)$$

3.2 充电站数量预估

设驶入高速路段的电动汽车电池中的电量比例为 x ($0 \leq x \leq 1$), 且电动汽车驶入与驶出的路口分别为 A_i, A_j ($i=1, 2, 3; j=4, 5$), 则电动汽车在该高速路段所消耗的电量在电池中的比例为:

$$y = \frac{A_j - A_i}{L_{\max}} \quad (18)$$

若电动汽车在该高速路段不需要充电, 则需满足:

$$x - y > 30\% \quad (19)$$

若电动汽车在该高速路段只充电 1 次, 则需满足:

$$\begin{cases} x - y \leq 30\% \\ x + 100\% - y > 30\% \end{cases} \quad (20)$$

化简, 可得:

$$-70\% < x - y \leq 30\% \quad (21)$$

若电动汽车在该高速路段需充电 2 次, 则需满足:

$$x + 100\% - y \leq 30\% \quad (22)$$

由该高速路段的长度、电动汽车的最大行驶里程及电量警戒值分析可知, 在该高速路段电动汽车

最多需要充电 2 次。

若该高速路段中的电动汽车所需要的充电电量总和为 S , 设充电站的标准容量配置为 S_m , 则可估算该路段所需建设的充电站数量:

$$m=\left\lceil \frac{S}{S_m} \right\rceil \tag{23}$$

设电动汽车电池的平均容量为 $50\text{ kW}\cdot\text{h}$, 充电站的标准容量配置为 20 台充电机, 则由式 (18)—(23) 计算可得, 该高速路段需建设 4 座充电站。

3.3 站址选择

按照式 (1)—(5) 所示方法, 并运用遗传算法对路段的充电站站址位置进行优化选择, 站址编码采用十进制实数编码方式, 适应度函数即为目标函数, 求得最优结果如表 1 所示。

表 1 充电站的站址
Tab.1 Location of charging stations

充电站序号 i	位置 l_i/km	充电汽车期望值 $C_{Ei}/\text{辆}$
1	19.84	849
2	39.63	730
3	72.65	659
4	104.00	968
合计	—	3206

由表 1 可以看出, 当 4 座充电站的位置分别选择 19.84 km、39.63 km、72.65 km、104.00 km 处时, 电动汽车充电车辆的期望值最大, 共为 3206 辆。充电车辆期望值随行驶里程的变化曲线如图 4 所示。

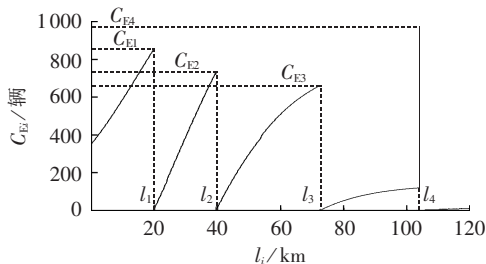


图 4 充电车辆期望值随行驶里程的变化曲线
Fig.4 Curve of charging vehicle expectation vs. driving mileage

在图 4 中, 在 l_4 处充电车辆期望值有一个激增量, 这是因为在 l_1 处充电的汽车行驶到 l_4 处时由于行驶消耗其电池内的电量又处于警戒值之内, 这部分电动汽车使得 l_4 处的充电车辆期望值产生了一个激增量。

3.4 容量优化配置

根据表 1 充电汽车期望值可得 4 个充电站的泊松流参数分别为 $\lambda_1=35.38, \lambda_2=30.42, \lambda_3=27.46, \lambda_4=40.33$ 。设充电机的充电时间为 30 min, 则 $\mu=2$ 。根据充电站的建设费用、运行维护费用、网损费用和运行年限测算每个充电机每小时的服务成本约为 $c_s=5.07$ 元, 设用户出行每小时时间价值^[22]为 $c_w=17$ 元,

利用式 (13) 和 (16) 对 4 个充电站的充电机进行优化配置。4 个充电站每小时的费用期望值分别如图 5—8 所示。

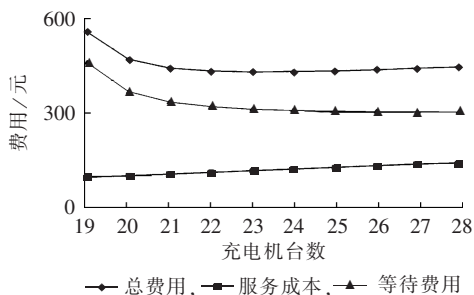


图 5 第 1 座充电站的费用曲线
Fig.5 Cost curves of the first station

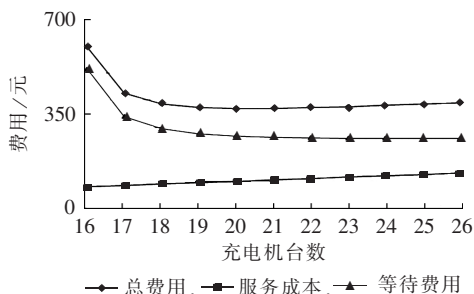


图 6 第 2 座充电站的费用曲线
Fig.6 Cost curves of the second station

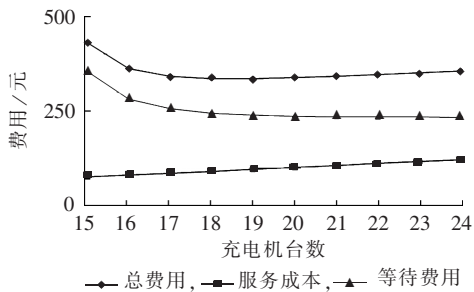


图 7 第 3 座充电站的费用曲线
Fig.7 Cost curves of the third station

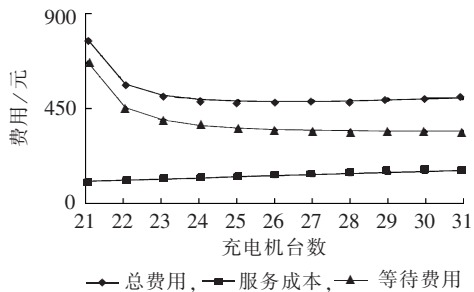


图 8 第 4 座充电站的费用曲线
Fig.8 Cost curves of the fourth station

由图 5—8 可以看出, 对于每座充电站都有最优的充电机配置台数使单位时间内充电站的服务成本和顾客等待费用之和最小, 4 座充电站充电机的最优配置及其对应的每小时费用期望值如表 2 所示。

根据充电站的配置, 利用式 (8)—(12) 计算 3 个充电站的运行指标如表 3 所示。

表 2 充电站的最优配置及每小时费用期望值

Tab.2 Optimal allocation of charging stations and expected cost per hour

充电站序号	充电机最优配置/台	费用期望值/(元·h ⁻¹)
1	23	426.74
2	20	369.58
3	19	335.47
4	26	483.68

表 3 4 个充电站的运行指标

Tab.3 Operational indicators of four charging stations

充电站序号	平均队长	平均排队长度	平均逗留时间/h	平均等待时间/h	充电机空闲比例/%
1	18.243	0.553	0.516	0.016	23.09
2	15.775	0.565	0.519	0.019	23.95
3	14.067	0.337	0.512	0.012	27.74
4	20.698	0.533	0.513	0.013	22.44

由表 3 可以看出,在 4 个充电站中,顾客的平均等待时间都不会超过 1.2 min,充电站为顾客提供了较好的服务,并且充电站的充电机空闲比例最高只有 27.74%,即充电站的充电机利用率达到了 72.26%以上。在满足顾客优质服务的基础上,充电站的资源得到了较好的利用。

4 结论与展望

本文在考虑电动汽车电量分布及行驶里程的情况下,提出了一种针对高速路段的充电站选址定容模型。高速路段充电站的布局主要是以路段中到充电站充电的电动汽车的数量期望值最大化为目标。充电站内的充电机台数选择则兼顾了充电站与顾客双方的利益,以充电站的服务成本和顾客的等待费用之和最小为目标来进行优化配置的,同时利用排队论原理分析了充电站的服务水平和运行效率。经过分析可以看出,充电机台数的合理配置,既可以为顾客提供较为优质的服务,也可以使得充电站的资源得到较好的利用。

本文所提出的充电站规划模型主要是基于电量分布和行驶里程等与电动汽车相关的因素来构造的,而对与充电站相连的配电系统相关的因素则暂未考虑,这将在后续的工作中进一步进行研究。

参考文献:

[1] 张文亮,武斌,李武峰,等. 我国纯电动汽车的发展方向及能源供给模式的探讨[J]. 电网技术,2009,33(4):1-5.
ZHANG Wenliang,WU Bin,LI Wufeng,et al. Discussion on development trend of battery electric vehicles in China and its energy supply mode[J]. Power System Technology,2009,33(4):1-5.

[2] 冯超,周步祥,林楠,等. Delphi 和 GAHP 集成的综合评价方法在电动汽车充电站选址最优决策中的应用[J]. 电力自动化设备,2012,32(9):25-29.
FENG Chao,ZHOU Buxiang,LIN Nan,et al. Application of com-

prehensive evaluation method integrating Delphi and GAHP in optimal siting of electric vehicle charging station[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(9):25-29.

[3] 宋永华,阳岳希,胡泽春. 电动汽车电池的现状及发展趋势[J]. 电网技术,2011,35(4):1-7.
SONG Yonghua,YANG Yuexi,HU Zechun. Present status and development trend of batteries for electric vehicles[J]. Power System Technology,2011,35(4):1-7.

[4] SMITH M. Batteries versus biomass as a transport solution[J]. Nature,2009,457(7231):785.

[5] 熊虎,向铁元,荣欣,等. 电动汽车电池更换站布局的最优规划[J]. 电力自动化设备,2012,32(9):1-6.
XIONG Hu, XIANG Tiejuan,RONG Xin,et al. Optimal allocation of electric vehicle battery swap stations[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(9):1-6.

[6] 高赐威,张亮. 电动汽车充电对电网影响的综述[J]. 电网技术,2011,35(2):127-131.
GAO Ciwei, ZHANG Liang. A survey of influence of electric vehicle charging on power grid[J]. Power System Technology,2011,35(2):127-131.

[7] HADLEY S W,TSVETKOVA A. Potential impacts of plug-in hybrid electric vehicles on regional power generation[R]. Oak Ridge, Tennessee:Oak Ridge National Laboratory,2008.

[8] 赵俊华,文福拴,杨爱民,等. 电动汽车对电力系统的影响及其调度与控制问题[J]. 电力系统自动化,2011,35(14):2-10.
ZHAO Junhua,WEN Fushuan,YANG Aimin,et al. Impacts of electric vehicles on power system as well as the associated dispatching and control problem[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(14):2-10.

[9] 苗铁群,江全元,曹一家. 考虑电动汽车及换电站的微网随机调度研究[J]. 电力自动化设备,2012,32(9):18-24.
MIAO Yiqun,JIANG Quanyuan,CAO Yijia. Microgrid stochastic dispatch considering electric vehicles and battery swap stations[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(9):18-24.

[10] 田立亭,史双龙,贾卓. 电动汽车充电功率需求的统计学建模方法[J]. 电网技术,2010,34(11):126-130.
TIAN Liting,SHI Shuanglong,JIA Zhuo. A statistical model for charging power demand of electric vehicles[J]. Power System Technology,2010,34(11):126-130.

[11] 刘鹏,刘瑞叶,白雪峰,等. 基于扩散理论的电动汽车充电负荷模型[J]. 电力自动化设备,2012,32(9):30-34.
LIU Peng,LIU Ruiye,BAI Xuefeng,et al. Charging load model based on diffusion theory for electric vehicles[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(9):30-34.

[12] 徐凡,俞国勤,顾临峰,等. 电动汽车充电站布局规划浅析[J]. 华东电力,2009,37(10):1672-1678.
XU Fan,YU Guoqing,GU Linfeng,et al. Tentative analysis of layout of electrical vehicle charging stations[J]. East China Electric Power,2009,37(10):1672-1678.

[13] 寇凌晨,刘自发,周欢. 区域电动汽车充电站规划的模型与算法[J]. 现代电力,2010,27(4):44-48.
KOU Lingfeng,LIU Zifa,ZHOU Huan. Modeling algorithm of charging station planning for regional electric vehicle[J]. Modern Electric Power,2010,27(4):44-48.

[14] 王震坡,孙逢春,林程. 电动公交客车充电站容量需求预测与仿

- 真[J]. 北京理工大学学报,2006,26(12):1061-1064.
- WANG Zhenpo,SUN Fengchun,LIN Cheng. Forecasting and simulation of the distribution capacity of E-bus charge station[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology,2006,26(12):1061-1064.
- [15] 吴春阳,黎灿兵,杜力,等. 电动汽车充电设施规划方法[J]. 电力系统自动化,2010,34(24):36-39.
- WU Chunyang,LI Canbing,DU Li,et al. A method for electric charging infrastructure planning[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(24):36-39.
- [16] IP A,FONG S,LIU E. Optimization for allocating BEV recharging stations in urban areas by using hierarchical clustering[C]// The 2nd International Conference on Data Mining and Intelligent Information Technology Applications(ICMIA 2010). Seoul,Korea; [s.n.],2010:460-465.
- [17] 任玉珑,史乐峰,张谦,等. 电动汽车充电站最优分布和规模研究[J]. 电力系统自动化,2011,35(14):53-57.
- REN Yulong,SHI Lefeng,ZHANG Qian,et al. Optimal distribution and scale of charging stations for electric vehicle[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(14):53-57.
- [18] 杜爱虎,胡泽春,宋永华,等. 考虑电动汽车充电站布局优化的配电网规划[J]. 电网技术,2011,35(11):35-42.
- DU Aihu,HU Zechun,SONG Yonghua,et al. Distribution network planning considering layout optimization of electric vehicle charging stations[J]. Power System Technology,2011,35(11):35-42.
- [19] 曹一家,谭益,黎灿兵,等. 具有反向放电能力的电动汽车充电设施入网典型方案[J]. 电力系统自动化,2011,35(14):48-52.
- CAO Yijia,TAN Yi,LI Canbing,et al. Typical schemes of electric vehicle charging infrastructure connected to grid[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(14):48-52.
- [20] 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.
- [21] 韩中庚. 实用运筹学模型、方法与计算[M]. 北京:清华大学出版社,2007:206-212.
- [22] 齐彤岩,刘冬梅,刘莹. 北京市居民出行时间成本研究[J]. 公路交通科技,2008,25(6):144-146.
- QI Tongyan,LIU Dongmei,LIU Ying. A study of the traveling cost of Beijing residents[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2008,25(6):144-146.

作者简介:

葛少云(1964-),男,河北曲阳人,教授,博士研究生导师,博士,主要从事城市电网规划、配电系统自动化和智能电网等方面的研究和教学工作;

冯亮(1984-),男,河北张家口人,博士研究生,主要从事城市电网规划、智能配电网和电动汽车充电站规划方面的研究和应用工作(E-mail:xiaoxiao_1302@163.com);

刘洪(1979-),男,天津人,讲师,博士,主要从事城市电网规划、评估和智能电网等方面的研究和应用工作;

王龙(1983-),男,浙江台州人,博士研究生,主要从事城市电网规划和智能配电网方面的研究和应用工作。

Planning of charging stations on highway considering power distribution and driving mileage

GE Shaoyun,FENG Liang,LIU Hong,WANG Long

(Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education,Tianjin University,Tianjin 300072,China)

Abstract: According to the traffic condition and power charging demand of highway,a planning model of charging stations on highway is established,which considers the influences of the power distribution and driving mileage of electric vehicles,takes the maximum expectation of electric vehicles coming to charging station as the objective of station location planning,takes the minimum total cost of station service and customer waiting time as the objective of charger quantity per station,and applies the queuing theory to analyze the service level and operational efficiency of charging station. The feasibility and effectiveness of the model are verified by case study.

Key words: electric vehicles; charging station planning; power distribution; driving mileage; queuing theory