

DOI: 10.7667/PSPC160958

电动汽车充电桩选址定容方法

段庆¹, 孙云莲¹, 张笑迪¹, 黄建川², 李浩文²

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 华融万新涿州投资有限责任公司, 河北 涿州 072750)

摘要: 提出了一种考虑不同类型充电桩之间相互补充的规划方法, 分别对住宅区内充电桩与公共充电桩进行分析。在确定住宅区内充电桩数量的基础上, 从计及电动汽车分布不平衡的充电需求确定、考虑充电距离最小的公共充电桩位置规划和计及电动汽车多日一充的充电桩容量确定三方面依次对社会公共充电桩规划进行分析, 从而确定了区域内整体充电桩规划流程。最后通过对涿州市高铁新城的充电桩设施进行规划, 说明了该规划方法的可行性。对比目前的其他规划方法, 该方法从最开始的充电需求确定到整体的规划流程都更多地考虑了充电桩使用中的实际情景, 因此规划结果也能加贴合实际。

关键词: 电动汽车; 充电桩规划; 充电需求; 选址; 定容

Location and capacity planning of electric vehicles charging piles

DUAN Qing¹, SUN Yunlian¹, ZHANG Xiaodi¹, HUANG Jianchuan², LI Haowen²

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430074, China;

2. Huarong Wanxin Zhuozhou Investment Co., Ltd., Zhuozhou 072750, China)

Abstract: As the planning and construction of electric vehicle charging pile plays a decisive role in the promotion of electric vehicles, this paper puts forward a planning method considering the cooperation of different types of charging piles and analyzes the residential and social charging piles. On the basis of determined number of charging piles in residential area, the planning of social charging piles is analyzed from the demand of charging considering the unbalance of electric vehicles' promotion, the location of charging piles considering the minimum charge distance and the capacity of charging piles considering the situation that EVs don't charge every day. And then the processes of planning are determined. Finally, the planning method is applied to a new city planning in Zhuozhou which could illustrate the feasibility of this method. Compared with other method, the proposed method pays more attention to the actual situation from the load forecast to the overall planning in the area, thus the result is more realistic and in line with the planning requirements.

Key words: electric vehicles; planning of charging piles; demand of charging; location selection; determine the capacity

0 引言

由于在绿色环保、节能减排方面的巨大优势, 电动汽车已在国内各大城市开始推广, 在未来几年, 国内的纯电动汽车将会在汽车领域内占据更大的市场^[1-3]。随着电动汽车数量的增长, 充电基础设施的需求也越来越大, 充电桩的建设成为制约电动汽车发展的重要因素, 充电桩规划就成了当前的热点问题^[1,4]。

目前研究中充电桩规划多是围绕选址与定容两方面进行的, 主要基于已有的城市格局^[5]、交通流量信息^[6]和配电网结构^[7], 考虑物理区域划分以及

电力网络结构等因素对于充电桩规划的约束, 并取得了很大的成果。文献[8]针对城市电动汽车充电站选址特点, 提出了一种两步优化选址方法, 分别分析了路段充电需求和城市交通网, 综合评定充电站选址; 文献[9]分析了交通、电力建设约束, 确定充电桩的建设位置, 并基于能量等效进行负荷预测, 确定充电桩建设容量, 完成充电桩选址定容; 文献[10]考虑了交通流量、城市道路等因素, 并将电网约束引入到电动汽车充电桩定容中, 考虑节点电压幅值、接入电网功率等约束条件以确定充电桩功率; 文献[11]基于城市道路确定充电站站址, 运用排队论确定了充电桩数量。但是, 目前的研究主要面向

社会充电桩, 没有考虑家庭充电桩与公共充电桩的互补关系, 影响了规划的全面性。

在上述背景下, 本文提出了一种小区内充电桩与公共充电桩互动的充电桩规划方法。首先分析电动汽车发展不平衡对于规划的影响, 确定充电需求; 而后给出社会充电桩作为辅助充电设施的选址依据, 确定了充电桩位置; 最后考虑了电动汽车充电间隔时间不固定对于充电负荷的影响, 以确定充电桩容量。以涿州新城 2025 年充电设施选址定容为例, 对所提出的方法做了说明。

1 充电桩规划整体步骤

2015 年底国务院发布的《关于加快电动汽车充电基础设施建设的指导意见》指出, 充电设施建设要以用户居住地停车位、单位停车场配建的专用充电设施为主体, 以公共停车场配建的公共充电设施为辅助, 形成立体式的电动汽车充电基础设施体系。这就要求通过对小区内电动汽车充电桩与小区外公共停车场充电桩的规划, 在城市整体层面满足电动汽车充电的需求。

鉴于此, 本文提出了立体式的充电桩规划方法, 将充电桩分为两类——小区内充电桩与公共快速充电桩。小区充电桩, 主要为固定用户提供慢速充电服务, 由于车位位置相对固定, 充电时间较集中, 慢速充电时间较长等原因, 小区内充电桩多为专车专用, 需根据电动汽车渗透率在小区内进行建设。公共充电桩, 主要用于满足充电桩供需不平衡引起的充电需求, 需要通过充电桩供需不平衡情况、车辆出行特点、行驶里程、电池容量、百公里耗电量、是否每天一充等因素进行分析。针对不平衡的充电需求, 以充电距离最短为目标函数进行建模, 确定公共充电桩位置; 考虑多日一充的情况, 对充电桩覆盖范围内充电负荷进行预测, 使公共充电桩容量需满足充电负荷最大时刻的电动汽车充电需求, 从而确定充电桩数量。公共快速充电桩的规划流程如图 1 所示。

2 充电桩规划方法

2.1 计及电动汽车分布不平衡的充电需求确定

电动汽车数可由小区规划车位数、车位利用率及电动汽车渗透率确定, 依据指导意见, 需按 1:1 比例建设慢速充电桩。然而, 电动汽车分布不平衡会使得小区内电动汽车实际数量偏离预测值, 导致电动汽车与充电桩之间的供需矛盾。鉴于目前国内住宅情况, 长时间将车辆停在其他小区进行充电, 或在其他小区购买车位充电的难度仍较大, 这就需

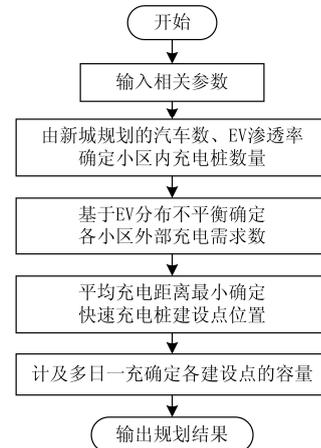


图 1 快速充电桩规划流程图

Fig. 1 Flow chart of fast charging piles planning

要建设公共充电桩来满足这部分充电需求。针对各个小区电动汽车分布不均衡, 可以采用蒙特卡洛方法进行模拟仿真, 以确定充电需求。

依据古典概率模型, n 个样本中具有某一属性的样本数量为 a , 则进行一次抽样所得样本具有某一属性的概率为

$$p = \frac{C_a^1}{C_n^1} = \frac{a}{n} \quad (1)$$

假设小区内有 N 辆汽车, 电动汽车的概率为 p , 针对小区内全部车辆进行判定, 确定电动汽车的数量。以上过程重复 10 000 次并对所得数据进行统计, 确定电动汽车数量分布服从 $N(\mu, \sigma)$ 的正态分布。

由中心极限定理可知, 从均值为 μ , 方差为 σ^2 的任意一个总体中抽取样本量为 N 的样本, 当 N 充分大时, 样本均值的抽样分布近似服从均值为 μ , 方差为 σ^2/n 的正态分布。对于正态分布 $N(\mu, \sigma)$, 随机变量有 99% 的概率分布在区间 $[u - 3\sigma, u + 3\sigma]$ 内, 故可用该置信区间对电动汽车数量的上下限值进行估计。其中, 电动汽车数量上限与均值的差值就是可能出现的最大不平衡车辆数 3σ , 即为充电需求。在整体样本均值一定的情况下, 整体区域内最大不平均车辆数 Q 为

$$Q = \frac{1}{2} \times 3 \sum_{i=1}^n \sigma_i \quad (2)$$

式中: n 为区域内小区的个数, $i=1, 2, \dots, n$; σ_i 为第 i 小区内电动汽车数量统计结果的方差。

2.2 基于充电距离最小的公共充电桩位置规划

充电距离是电动汽车到最近充电桩的距离。根据各小区充电需求和充电距离, 确定公共充电桩建设的最佳位置及其服务范围。

2.2.1 充电桩位置规划模型

若在某一区域内含有多个可为电动汽车充电的充电桩建设点，该区域内电动汽车总是会选择距离自己最近的建设点进行充电，这就使得整个区域划分成多个小型分域，每个小型区域即是对应的建设点内充电桩应满足的负荷需求范围，即其服务范围。

1) 目标函数

某特定范围内电动汽车充电桩规划目标为：各个小区到达充电桩的加权总距离之和最小。其目标函数为

$$f(x) = \min \left(C_i \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \min S_{i,j} \right) \quad (3)$$

式中： $\min S_{i,j}$ 为第 i 小区到 m 个充电建设点中最近的一个的距离； C_i 为第 i 个小区的电动汽车数； m 为电动汽车建设点个数。

2) 约束条件

(a) 公共充电桩位置约束

由于公共充电桩主要建设在公共停车场内，故选取的公共充电桩位置要在公共停车场范围内，即公共充电桩位置约束：

$$(x, y) \in A \quad (4)$$

式中， A 为停车场位置坐标集。

(b) 停车场数量约束

由于停车场数量有限，故需要对 m 进行约束，即停车场数量约束

$$m \leq M \quad (5)$$

式中， M 即为停车场总数。

2.2.2 TLBO 优化算法

TLBO 算法模拟老师教学和学生学习的过程，通过“教”与“学”两个阶段来实现寻优。该方法具有计算精度高、收敛速度快、运算量小、对于非线性优化全局收敛性好、不受算法参数变化的制约等特点，且只需设置群体数量和结束条件，就可以求解优化问题^[12-14]。鉴于文中优化目标为单目标，且需要较快的收敛速度，选取 TLBO 算法对优化问题进行求解。在本文中，以拟建点坐标为变量，充电总距离最小为寻优目标，其算法流程如图 2 所示。

2.3 计及多日一充的充电容量确定

一日一充限制了用户的自由以降低计算难度，但将造成电池的浪费。文献[15]在考虑充电个体需求和用户意愿的基础上提出电动汽车有序充电策略。依据英国 2014 年的交通运输调查(National Travel Survey: England 2014)显示，每日出行次数为 2 次以下的受访者到达了 59.91%，98.25%的受访者每日出行次数为少于 5 次。而针对每次出行，低于 8 km

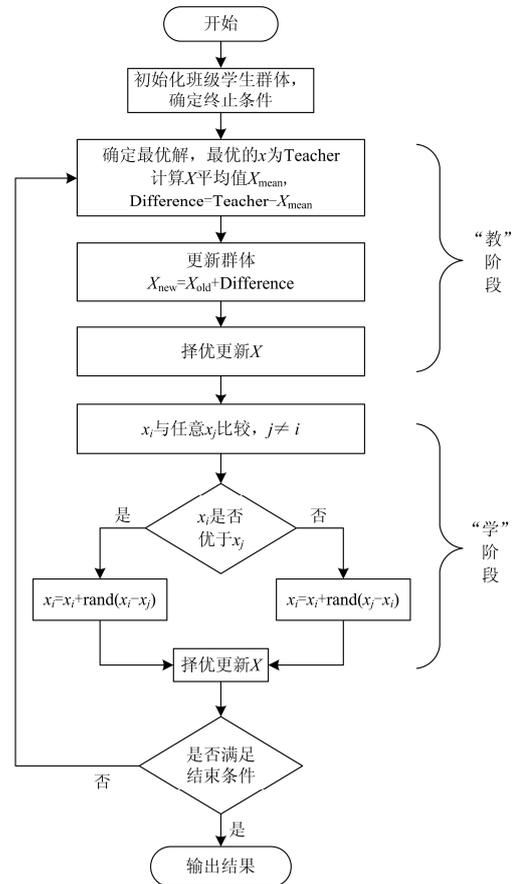


图 2 TLBO 算法流程图

Fig. 2 Flow chart of TLBO algorithm

的出行占到总出行的 66%。相关调研数据表明，84.25% 的用户日行驶里程小于 60 km^[16-17]，当电动汽车续航里程为 300 km 时，这部分用户的日耗电量仅占车载电池容量的 20%，一日一充^[18-20]模式将会对电池容量造成极大的浪费，同时也不符合大多数用户的使用习惯，故应考虑多日一充的情况。

2.3.1 电动汽车充电判断依据

考虑多日一充的情况，需针对每天电动汽车是否进行充电进行判断，根据不同的电动汽车起始充电电量判定当日是否充电，设充电概率为 p_c ，则有

$$p_c = \begin{cases} 0 & 90\% < x \\ f(x) & 50\% < x \leq 90\% \\ 1 & 0 < x \leq 50\% \end{cases} \quad (6)$$

式中， $f(x)$ 为充电概率函数，其取值由剩余电量 x 确定，设定其满足式(7)。

$$f(x) = \begin{cases} 0.2 & 80\% < x \leq 90\% \\ 0.4 & 70\% < x \leq 80\% \\ 0.6 & 60\% < x \leq 70\% \\ 0.8 & 50\% < x \leq 60\% \end{cases} \quad (7)$$

$$g(p_c) = \begin{cases} 0 & k < p_c \\ 1 & k > p_c \end{cases} \quad (8)$$

式中: $g(p_c)$ 为判断函数; k 为(0, 1)区间内的随机数。

2.3.2 电动汽车充电里程的确定

电动汽车的行驶里程直接关系到其充电负荷, 如果电动汽车设置为每天进行一次充电, 则每日行驶里程即为所需充电里程。当涉及多日一充情况时, 电里程应为自上次充电结束后所行驶的总里程, 故需要对行驶总里程进行计算, 设总里程为 S , 则有:

$$S = (((S_n \times w_n + S_{n-1}) \times w_{n-1} + S_{n-2}) \times w_{n-2} + \dots + S_0) \times w_0 \quad (9)$$

经推导可得

$$S = S_n \times w_n \times w_{n-1} \times \dots \times w_0 + \dots + S_0 \times w_0 \quad (10)$$

式中: S_n 为第前 n 天电动汽车行驶里程; w_n 为对应前 n 天的总里程充电系数, 可以通过式 $w_n = f(p_n)$ 确定。

3 算例分析

以河北省涿州市高铁新城充电桩规划为例进行分析, 该新城处于规划建设阶段, 居住区内车位数为 52 940 个, 划分为 41 个区域, 预计到 2025 年新城住宅区车位利用率达到 90%, 电动汽车渗透率为 20%。各小区按照车位数的 20% 预留建设交流慢速充电桩, 并在公共停车场内建设直流快速充电桩^[21-23]。

3.1 充电需求确定

依据文中 2.1 节所提出的方法对小区内汽车进行判断, 可得每个小区内电动汽车的最大不平衡数。所得结果如表 1 所示。

表 1 不平衡车辆数

Table 1 Unbalanced number of vehicles

编号	不平衡车辆数	编号	不平衡车辆数	编号	不平衡车辆数
1	29	15	29	29	15
2	32	16	25	30	31
3	24	17	17	31	29
4	19	18	16	32	26
5	19	19	24	33	27
6	19	20	21	34	26
7	16	21	22	35	27
8	19	22	0	36	28
9	18	23	0	37	36
10	18	24	0	38	35
11	16	25	0	39	28
12	15	26	0	40	18
13	23	27	12	41	23
14	15	28	17		

3.2 充电桩选址

以各小区充电需求为权重, 以总充电距离最小为寻优目标, 利用 TLBO 寻优算法确定公共停车场的最佳建设位置。根据实际项目要求, 可供选择的停车场数量为 2~5 个, 建设点位置及分区如图 3 所示。

总充电距离与停车场数量统计结果如表 2 所示。

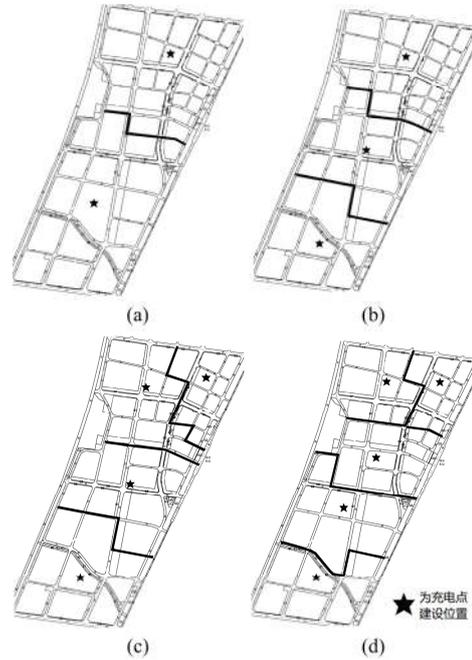


图 3 不同建设点位置及分区

Fig. 3 Different construction point location

表 2 不同建设点数时充电距离

Table 2 Charge distance of different construction points

建设点个数	总充电距离/km	总距离减少百分比/%
2	516.2	—
3	401.3	22.25
4	347.2	13.49
5	308.3	11.20

依据总距离减少百分比的变化、工程建设需要以及投资限制, 选取方案(b)即建设 3 个公共充电停车场作为最终规划方案。该方案具有较小的总充电距离, 同时在充电桩购置费用相同的基础上, 兼顾了较小的公共停车场改建成本, 适合应用于河北省涿州市高铁新城充电桩规划中。

3.3 充电桩功率确定

考虑多日一充的情况, 预测该服务范围内的充电需求, 使用蒙特卡洛方法预测公共停车场快速充电桩的充电负荷曲线, 并确定充电桩建设数量以满足范围内的充电需求。本文中将一天 24 h 分为 96

个时间点，小区内车辆回家到达时间分布如式(11)所示。

$$y = 0.595e^{-\frac{(x-73.77)^2}{2.17^2}} + 0.405e^{-\frac{(x-77.67)^2}{3.77^2}} \quad (11)$$

每日出行次数统计结果如表 3 所示。

表 3 日出行次数统计表

Table 3 Statistical results of daily travels

出行次数	比例/%	出行次数	比例/%	出行次数	比例/%	出行次数	比例/%
0	6.63	6	3.49	3	22.99	9	0.16
1	17.86	7	1.16	4	4.72	10	0.01
2	34.70	8	0.41	5	7.86	11	0.01

4 结语

本文提出了一种考虑不同种类充电桩之间相互补充的充电桩选址定容方法，分别考虑了小区内充电桩和公共充电桩的规划，主要完成了下述研究工作。

1) 将电动汽车充电桩进行了分类，提出了计及电动汽车分布不平衡的充电需求确定方法。

2) 提出了以充电用户的充电距离最短为目标的充电桩选址优化模型，将 TLBO 算法应用于电动汽车充电桩选址优化计算中。

3) 提出了计及多日一充的电动汽车充电负荷预测方法，所得结果比原有的设定每天充电更加贴近实际情况。

通过对河北省涿州市高铁新城充电设施布局规划的研究，介绍了该方法的实际应用。目前的充电桩规划体系还不完善，更多的是在理论层面的研究。随着电动汽车越来越多地进入各大城市，电动汽车运行充电数据的增加，这种立体式分类型的规划方法也将得到进一步的完善。

参考文献

[1] 杨茜, 邓建慎, 李洪峰, 等. 电动汽车公共服务与互动平台设计研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 137-144.
 YANG Xi, DENG Jianshen, LI Hongfeng, et al. Design and research on public service and interactive platform in electric vehicle[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(10): 137-144.

[2] MOHSENIAN-RAD A H, WONG V W S, JATSKEVICH J R, et al. Autonomous demand-side management based on game theoretic energy consumption scheduling for the future smart grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(3): 320-331.

[3] 路欣怡, 刘念, 陈征, 等. 电动汽车光伏充电站的目标

优化调度方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 46-56.
 LU Xinyi, LIU Nian, CHEN Zheng, et al. Multi-objective optimal scheduling for PV-assisted charging station of electric vehicles[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 46-56.

[4] 许庆强, 寇英刚, 马建伟, 等. 电动汽车充换电设施典型设计方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 118-124.
 XU Qingqiang, KOU Yinggang, MA Jianwei, et al. Research on typical design scheme of charging/battery swap infrastructure for electric vehicle[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 118-124.

[5] 刘志鹏, 文福拴, 薛禹胜, 等. 电动汽车充电站的最优选址和定容[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(3): 54-59.
 LIU Zhipeng, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. Optimal siting and sizing of electric vehicle charging stations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(3): 54-59.

[6] 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. Typical schemes of electric vehicle charging infrastructure connected to grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(24): 36-39.

[7] 王辉, 王贵斌, 赵俊华, 等. 考虑交通网络流量的电动汽车充电站规划[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(13): 63-69.
 WANG Hui, WANG Guibin, ZHAO Junhua, et al. Optimal planning for electric vehicle charging stations considering traffic network flows[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(13): 63-69.

[8] 高亚静, 郭艳东, 李天天. 城市电动汽车充电站两步优化选址方法[J]. 中国电力, 2013, 46(8): 143-147.
 GAO Yajing, GUO Yandong, LI Tiantian. Optimal location of urban electric vehicle charging stations using a two-step method[J]. Electric Power, 2013, 46(8): 143-147.

[9] 郭春林, 肖湘宁. 电动汽车充电基础设施规划方法与模型[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(13): 70-75.
 GUO Chunlin, XIAO Xiangning. Planning method and model of electric vehicle charging infrastructure[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(13): 70-75.

[10] 黄小庆, 杨夯, 陈颀, 等. 基于 LCC 和量子遗传算法的电动汽车充电站优化规划[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(17): 176-182.
 HUANG Xiaoqing, YANG Hang, CHEN Jie, et al. Optimal planning for electric vehicle charging stations based on life cycle cost and quantum genetic algorithm[J].

- Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 176-182.
- [11] 赵书强, 李志伟. 基于差分进化粒子群算法的城市电动汽车充电桩最优规划[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2015, 42(2): 1-7.
ZHAO Shuqiang, LI Zhiwei. Optimal planning of charging station for electric vehicle based on PSONE algorithm[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science), 2015, 42(2): 1-7.
- [12] RAO R V, SAVSANI V J, VAKHARIA D P. Teaching-learning-based optimization: an optimization method for continuous non-linear large scale problems[J]. Information Sciences, 2012, 183(1):1-15.
- [13] SATAPATHY S C, NAIK A, PARVATHI K. Weighted teaching-learning-based optimization for global function optimization[J]. Applied Mathematics, 2013, 4(3): 429-439.
- [14] RAO R V. Applications of TLBO algorithm and its modifications to different engineering and science disciplines[M] // Teaching Learning Based Optimization Algorithm, 2016.
- [15] 党杰, 汤奕, 宁佳, 等. 基于用户意愿和出行规律的电动汽车充电负荷分配策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 8-15.
DANG Jie, TANG Yi, NING Jia, et al. A strategy for distribution of electric vehicles charging load based on user intention and trip rule[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 8-15.
- [16] DARABI Z, FERDOWSI M. Impact of plug-in hybrid electric vehicles on electricity demand profile[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2011, 2(4): 501-508.
- [17] 张德欣, 陈金川, 刘莹. 北京市私人机动车交通出行特征及发展对策[C] // 交通运输领域国际学术会议, 2006.
ZHANG Dexin, CHEN Jinchuan, LIU Ying. Daily travel characteristics and the development strategy of private motor vehicles in Beijing[C] // Proceedings of the 6th International Conference of Transportation Professionals, 2006.
- [18] 刘文学, 梁军, 贲志皓, 等. 基于可信理论的多目标模糊机会约束无功优化[J]. 电工技术学报, 2015, 30(21): 82-89.
LIU Wenxue, LIANG Jun, YUN Zhihao, et al. Multi-objective fuzzy chance constrained optimal reactive power flow based on credibility theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(21): 82-89.
- [19] 张谦, 蔡家佳, 刘超, 等. 基于优先权的电动汽车集群充放电优化控制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(17): 117-125.
ZHANG Qian, CAI Jiajia, LIU Chao, et al. Optimal control strategy of cluster charging and discharging of electric vehicles based on the priority[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(17): 117-125.
- [20] 张齐东, 黄学良, 陈中, 等. 电动汽车电池更换站集群充电控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 447-453.
ZHANG Qidong, HUANG Xueliang, CHEN Zhong, et al. Research on control strategy for the uniform charging of electric vehicle battery swapping station[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 447-453.
- [21] 贾晶晶, 郭敏嘉, 范春燕, 等. 新能源汽车充电服务发展瓶颈及商业模式探讨[J]. 陕西电力, 2016, 44(1): 46-50.
JIA Jingjing, GUO Minjia, FAN Chunyan, et al. The bottleneck of the development of new energy vehicle charging services and the business model[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(1): 46-50.
- [22] 宋旭东, 张晓平, 余南华, 等. 考虑分布式能源接入的配电网规划及其关键技术综述[J]. 陕西电力, 2015, 43(3): 38-42, 87.
SONG Xudong, ZHANG Xiaoping, YU Nanhua, et al. Considering distributed energy access in distribution network planning and its key technology[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(3): 38-42, 87.
- [23] 胡传胜, 周玲, 程蒙, 等. 含电动汽车和分布式电源的配电网动态重构[J]. 陕西电力, 2015, 43(4): 1-4.
HU Chuansheng, ZHOU Ling, CHENG Meng, et al. Dynamic optimization of distributed network reconfiguration considering electric vehicle and distributed generation[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(4): 1-4.

收稿日期: 2016-06-27; 修回日期: 2016-08-17

作者简介:

段庆(1987—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统自动化技术、电力系统新能源技术; E-mail: 2014202070073@whu.edu.cn

孙云莲(1962—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统新能源技术、电能质量分析与控制、智能电网。E-mail: ylsun@whu.edu.cn

(编辑 葛艳娜)