

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

赵书强,李志伟,党 磊

(华北电力大学 电气与电子工程学院,河北 保定 071003)

摘要: 针对电动汽车充电站规划问题,给出两步搜索的电动汽车充电站选址定容的分析方法,提出电动汽车充电站选址的最优数学模型。基于城市道路信息,得出充电站最优位置分布,采用 Voronoi 图划分每个充电站所服务的负荷区,根据每个充电站所服务的充电负荷设计其容量。算例分析验证了规划方法的有效性和实用性。

关键词: 电动汽车; 充电站; 聚类分析; 集覆盖; 充电站选址; 充电站容量计算; 优化

中图分类号: TM 64;U 469.72

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.10.002

0 引言

目前电动汽车产业发展迅猛,按照国家新能源汽车的相关政策和国际上技术发展趋势,10年内混合动力汽车和纯电动汽车将作为一种比较成熟的交通工具得到规模化应用。电动汽车的发展需要配套充电站发展作为支撑,布局合理的电动汽车充电站规划对电动汽车的普及发展将起到不可替代的作用^[1]。电动汽车充电站的选址和定容需要充分考虑本区域交通道路状况及电动汽车发展规模。

目前对于城市内电动汽车充电站的布局规划研究正在起步阶段,研究还不完善,还没有建立起完整的体系。文献[2]分析了影响电动汽车充电站布局的因素,介绍了充电站规划的原则。文献[3]综合考虑多个因素,提出两阶段优化算法,第一阶段先计算出充电需求,第二阶段通过优化算法确定充电站站址。文献[4]以居民负荷情况来模拟电动汽车的数量,利用层次分析法来确定充电站候选站址的权系数,利用费用最少来完成充电站的选址定容。文献[5]运用动态交通网络思想将充电者充电成本和充电站投资成本最小作为优化目标,建立了基于硬时间窗约束下的充电站布局模型,提出了求解该模型的两阶段启发式算法。文献[6]将电动汽车充电设施划分为示范、公益和商业运行3个阶段,并根据各阶段的特点提出了充电设施规划的原则和模型。文献[7]基于区域交通流量守恒原理做出了交通总量和分布的预测,建立了年最小费用模型并运用遗传算法对实例进行求解。文献[8]以俘获的交通流量最大、配电系统网络损耗最小以及节点电压

偏移最小为目标,建立了充电站最优规划的多目标决策模型,通过采用改进的二进制粒子群优化算法对模型进行了求解。文献[9]根据地理因素和服务半径来确定充电站的候选站址,以规划期内的充电站总成本最小为目标建立了充电站最优规划模型,并采用改进的对偶内点法进行了求解。文献[10]运用博弈论对给定的充电站待选方案进行综合评价,进而筛选出最优方案。文献[11]综合分析了影响电动汽车充电站规划的若干因素,建立了电动汽车充电站规划的最大收益模型。文献[12]以用户在充电路程中的损耗成本和充电路路投资之和最小为目标,进行充电站站址和接入位置的选择,以全社会成本最小为目标进行充电站方案的优化。

到目前为止,国内外在充电站规划方面的研究还处于初级阶段,尚未形成完整、系统的模型和方法。现有模型大多从经济性考虑出发,优化结果使总费用最小^[13]。充电站属于服务性公共场所,建设充电站需充分考虑城市交通网络信息,最大限度地方便电动汽车车主的充电^[14]。为此,本文提出基于城市道路信息来确定充电站候选站址,根据充电站需要服务的电动汽车的数量,采用排队论来确定充电站充电机数量,进而确定充电站容量的两步搜索最优模型。

1 电动汽车充电站布局最优化的数学模型

电动汽车充电站的选址将直接影响车主在路上的行驶成本(去往充电站路上的耗时和耗能)。假设电动汽车在行驶过程中需要充电时,就到最近的充电站进行充电,则充电站的服务区域可以用 Voronoi 图来进行划分。当充电站数量较多时,相应的充电站服务区域 Voronoi 图面积就小,车主的行驶成本就小。相反,当充电站数量较少时,相应的 Voronoi 图面积就大,车主的行驶成本就大。因此,车主的行驶成本与电动汽车充电站的数量明显相关,大量的充电站会减

收稿日期:2015-04-08;修回日期:2016-06-21

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2011-AA11A278)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2011-AA11A278)

小行驶成本,但同时会增加建设充电站的成本。因此,需要综合考虑车主行驶成本与充电站建设成本,保证车主在城市的任意位置都在不超过某一最大距离 l 内可以找到充电站进行充电,显然这一距离与电动汽车的续驶里程 L 有关,同时与充电便捷系数 α 有关。它们之间满足如下关系:

$$l=L \times \alpha \quad (1)$$

1.1 电动汽车的续驶里程

电动汽车的续驶里程是指电动汽车从动力电池以充满状态开始,到标准规定的实验结束时所走过的里程^[15],它是电动汽车充电站建设的重要参考指标^[16]。相邻两充电站间的距离必须小于电动汽车的续驶里程。

1.2 电动汽车充电便捷系数

电动汽车充电便捷系数 α 直接影响城市电动汽车充电站建设的建设成本、车主的行驶成本以及车主在充电站的排队等待成本; α 较大时,车主行驶成本和车主在充电站排队等待成本会增大; α 较小时,电动汽车充电站建设数量将增多,导致城市充电站建设成本将升高。 α 的取值以充电站建设成本、车主行驶成本以及车主在充电站排队等待成本之和最小为原则进行确定。总成本表示如下:

$$C_{\text{all}}=C_c(\alpha)+C_d(\alpha)+C_w(\alpha) \quad (2)$$

其中, $C_c(\alpha)$ 为电动汽车充电站的建设成本; $C_d(\alpha)$ 为电动汽车去充电站途中产生的耗电成本和耗时成本; $C_w(\alpha)$ 为电动汽车在充电站排队充电过程中产生的排队等待成本。

充电站的建设成本包括固定投资和运行成本。固定投资主要是土地占用成本及充电机、变压器和其他辅助设备投资成本。运行成本主要包括员工工资、设备维护与检修、电费等。充电站总成本折算到每天表示如下:

$$C_c(\alpha)=\frac{1}{365} \sum_{i=1}^h \left[f_1(Q_i) \frac{r_0(1+r_0)^m}{(1+r_0)^m-1} + f_2(Q_i) \right] \quad (3)$$

$$Q_i=f(\alpha) \quad (4)$$

其中, $f_1(Q_i)$ 为第 i 个充电站与其配置充电机数 Q_i 有关的固定投资; $f_2(Q_i)$ 为第 i 个充电站与其配置充电机数 Q_i 有关的年运行成本; m 为充电站折旧年限,取 20 a; r_0 为贴现率,取 0.08; h 为要建设的充电站的总数。式(4)表示充电站的充电机个数是关于充电便捷系数 α 的函数。

充电站固定投资采用站内充电机数量二阶多式模型表示^[17]。其中, a_1 为营业建筑等固定不变投资, a_2 为充电机购置成本等与充电机数量成比例的相关成本, a_3 为变压器、电缆等与充电机数量平方成比例的相关成本。年运行费用取固定投资成本的 50%。即:

$$f_1(Q_i)=a_1+a_2 Q_i+a_3 Q_i^2 \quad (5)$$

$$f_2(Q_i)=0.5 a_1+0.5 a_2 Q_i+0.5 a_3 Q_i^2 \quad (6)$$

电动汽车的充电行驶成本与其到充电站的距离以及在此期间耗费的时间有关。

$$C_d(\alpha)=\sum_{i=1}^h [\bar{d}_i(\alpha) k_1 c + \beta \bar{d}_i(\alpha) / v] \times V_i(\alpha) \quad (7)$$

其中, $\bar{d}_i(\alpha)$ 为电动汽车到第 i 个充电站的平均距离,与充电便捷系数有关; k_1 为电动汽车每 100 km 耗电量; c 为电动汽车在充电站充 1 kW·h 电所缴纳的电费; v 为电动汽车去往充电站途中的平均速度; β 为电动汽车由于耗时所损失的收入; $V_i(\alpha)$ 为每天需要到第 i 个充电站进行充电的电动汽车数量。

采用常规充电方式的电动汽车,其车主通常不会在充电站等待。而采用快速充电方式的车主都想尽快完成充电,以继续自己的行驶。因此,对于采用快速充电的车主而言,在充电站排队充电就会产生排队等待成本。这部分电动汽车在排队过程中的排队成本与平均等待时间有关:

$$C_w(\alpha)=\sum_{i=1}^h w_{qi} \times \gamma_i(\alpha) \times 24 \quad (8)$$

其中, w_{qi} 为第 i 个充电站快速充电的电动汽车等待时长的平均值; $\gamma_i(\alpha)$ 为每小时到第 i 个充电站进行快速充电的电动汽车数量。

假设电动汽车到达充电站的时间间隔相互独立,且服从参数为 γ 的负指数分布。假设电动汽车充电过程的充电时间长短独立且同分布,服从参数为 μ 的负指数分布。由分析可知,电动汽车到达充电站进行充电的过程是典型的 M/M/S 等待制排队模型。由文献[18]可知系统平稳分布时,车主平均等待时间与充电站内快速充电机个数 S 的关系如下:

$$W_q=\frac{\rho^S}{S!(1-\rho_S)} p_0 \int_0^\infty t d(-e^{-(1-\rho_S)S\mu}) \quad (9)$$

$$\rho_S=\frac{\gamma}{S\mu}, \quad p_0=\left[\sum_{i=0}^{S-1} \frac{\rho^i}{i!} + \frac{\rho^S}{S!(1-\rho_S)} \right]^{-1}$$

其中, γ 为电动汽车的到达率; μ 为充电站的平均服务率; S 为充电站内快速充电机的个数; ρ 为服务强度; ρ_S 为服务台数量为 S 时排队模型的服务强度。

采用典型城市数据可得充电站建设成本、充电行驶成本和充电排队等待成本之和,与充电便捷系数 α 的函数关系如图 1 所示。由图可见, α 取值在 0.05~0.12 之间总成本处在比较低的水平。因此,充电便捷

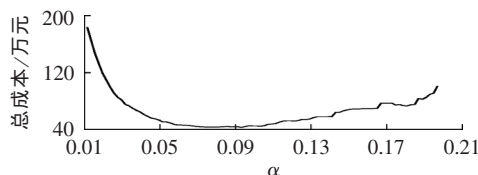


图 1 总成本与充电便捷系数函数关系图

Fig.1 Curve of total cost vs. convenience coefficient

系数 α 的建议取值范围为 $[0.05, 0.12]$ 。

充电便捷系数 α 的取值与城市交通以及经济状况直接相关。对于某一具体城市, α 可以由其交通状况、经济状况, 以式(2)所示的总成本最小为原则进行确定。但是每个城市在进行充电站规划时, 都进行一遍类似计算既不现实也没必要。一方面, 有些城市缺少必要的统计数据, 无法完成相关计算; 另一方面, 城市之间交通以及经济的发展具有相似性, 具有相似性的不同城市 α 的取值可以相同。这样便于充电站的标准化建造, 缩短充电站设计时间, 节省充电站设计费用。

下面采用基于主成分的聚类分析将全国 31 个省市自治区进行分类, 以便为不同省市自治区 α 的取值提供参考。同一类地区建立充电站, α 取值应相同或相近。

层次聚类又称为系统聚类, 它把最终的层次看作是一个从数据对象到数据类的层次映射模型^[19]。其方法的思想是将数据对象构造成一棵聚类树, 离差平方和法在凝聚的类层次法中应用比较广泛。离差平方和法的具体思想是将数据各自成一类, 然后每次减少一类, 这样离差的平方和就要增大, 选择方差增加最小的 2 个类合并, 直到满足条件^[20]。

设将 g 个数据对象分成 C_1, C_2, \dots, C_k 共 k 个类, 用 x_{iq} 表示 C_q 中的第 i 个数据对象, n_q 表示 C_q 中数据的个数, \bar{x}_q 表示 C_q 的重心, 则 C_q 的离差平方和为:

$$G_q = \sum_{i=1}^{n_q} (x_{iq} - \bar{x}_q)^T (x_{iq} - \bar{x}_q) \quad (10)$$

若 C_i, C_j 合并成新类 C_h , 类内离差平方和变为:

$$G_h = \sum_{m=1}^{n_h} (x_{mh} - \bar{x}_h)^T (x_{mh} - \bar{x}_h) = G_i + G_j + n_j(\bar{x}_i - \bar{x}_j)^T (\bar{x}_i - \bar{x}_j) - \frac{n_i n_j}{n_h} (\bar{x}_i - \bar{x}_j)^T (\bar{x}_i - \bar{x}_j) \quad (11)$$

实际问题中遇到的聚类问题多为多因素的问题, 且在多数情况下各因素之间常常存在一定的相关性。因素较多且各因素之间存在相关性, 增加了聚类问题的复杂性, 为此需要对原始因素进行主成分分析, 从多个因素中综合为少数几个有代表性的因素, 这几个因素既能代表原始绝大多数信息, 又互不相关。

因为 α 的取值既与区域交通水平有关又与区域经济水平有关, 在对全国 31 个省市自治区 α 取值进行区域划分时, 选取人均 GDP、人口数、民用汽车拥有量、旅客周转量、货运周转量、公路面积密度 6 个反映区域社会经济与交通发展水平的评价指标^[21]。指标的原始统计数据来自《中国区域经济统计年鉴》。

通常原始数据各因素之间都会有较大的相关性, 在此用相关系数来表征各变量之间的相关性。两变量 x, y 之间的相关系数计算公式如下:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \times \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (12)$$

其中, \bar{x} 为变量 x 的平均值; \bar{y} 为变量 y 的平均值。

计算各因素之间的相关系数矩阵, 结果如表 1 所示, 由结果可知各因素之间存在着显著相关关系。变量之间直接的相关性比较强, 证明它们存在信息上的重叠。为此, 需要对原始指标提取主成分。对于原始变量 $X = (X_1, X_2, \dots, X_p)^T$ 存在线性变换, 使得新变量 Z 的任意一行计算如下:

$$Z_i = a_{1i}X_1 + a_{2i}X_2 + \dots + a_{pi}X_p = a_i^T X \quad (13)$$

其中, $a_i = (a_{1i}, a_{2i}, \dots, a_{pi})^T$ 表示由原指标过渡到新的综合指标的系数矩阵的列向量。

表 1 各因素相关系数矩阵

Table 1 Correlation between different factors

因素	人均 GDP	人口数	民用汽车	旅客周转	货运周转	公路面积密度
人均 GDP	1.000	-0.046	0.405	0.085	-0.052	0.537
人口数	-0.046	1.000	0.774	0.903	0.687	0.493
民用汽车	0.405	0.774	1.000	0.821	0.526	0.549
旅客周转	0.085	0.903	0.821	1.000	0.625	0.512
货运周转	-0.052	0.687	0.526	0.625	1.000	0.400
公路面积密度	0.537	0.493	0.549	0.512	0.400	1.000

可以容易知道对于 Z_i 的方差计算如下:

$$\delta_{\text{var}}(Z_i) = a_i^T D(X) a_i \quad (14)$$

$\delta_{\text{var}}(Z_i)$ 越大, 表示 Z_i 包含的信息越多^[22]。主成分分析需要保留尽可能多的信息, 即新生成的较少的综合变量的方差之和尽可能接近原始变量的方差之和。 Z_1 是 X 的所有线性函数中方差最大的一个。之后的主成分提取是在与之前已经提取出的主成分线性无关的前提下, 以方差最大为原则进行的。由式(14)可知全体主成分的方差为:

$$\delta_{\text{var}}(Z) = A^T D(X) A = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n) \quad (15)$$

由式(15)可得, 新提取的各主成分的方差分别为 X 的协方差矩阵 $D(X)$ 的特征值。计算 X 的协方差矩阵 $D(X)$ 的特征值, 得每次提取的主成分所能解释的方差, 结果见表 2。

表 2 各因素方差解释表

Table 2 Explanation of variance for each factor

成分	初始特征值		
	新提取主成分的方差	占总方差的贡献率/%	累积贡献率/%
1	3.617	60.291	60.291
2	1.358	22.637	82.928
3	0.499	8.313	91.240
4	0.351	5.855	97.095
5	0.101	1.691	98.786
6	0.073	1.214	100.000

由方差解释表可以看出, 前 2 个公共因子可以解释总方差的 82.9%, 即总体多于 80% 的信息可以由

这 2 个公共因子来解释。因这 2 个公共因子基本保留了原来指标信息,故可选取这 2 个因子作为主成分对原始数据进行分析。这样,原来 6 个指标转化为 2 个新指标。对应提取的 2 个主成分的方差,即 $D(X)$ 的特征值 λ_i ,可以计算该特征值对应的特征向量 P_i ,即是各因素的初始载荷矩阵。

$$P_i D(X) = \lambda_i D(X) \quad (16)$$

计算各因素初始载荷矩阵结果如表 3 所示。从表 3 中可看出,人口数、民用汽车拥有量、旅客周转量、货运周转量、公路面积密度在第一主成分上有较高载荷,说明第一主成分基本反映这些指标的信息。人均 GDP 在第二主成分上有较高载荷,说明第二主成分主要反映的是该指标的信息。故用这 2 个新变量来代替原来的 6 个变量。第一主成分反映的均为交通情况的指标,命名为交通指标 ZF_1 ;第二主成分反映的为经济情况的指标,命名为经济指标 ZF_2 。

表 3 各因素初始载荷矩阵

Table 3 Initial loads for different factors

因素	第一主成分	第二主成分
旅客周转量	0.921	-0.194
人口数	0.907	-0.319
民用汽车拥有量	0.900	0.135
货运周转量	0.742	-0.347
公路面积密度	0.711	0.482
人均 GDP	0.285	0.920

用各因素的初始载荷 P_i 除以对应的特征值 λ_i 开平方,便可得到 2 个主成分中原来每个指标所对应的系数^[22]。经过计算,2 个主成分表达式如下:

$$\begin{aligned} ZF_1 &= 0.484ZX_1 + 0.477ZX_2 + 0.473ZX_3 + 0.39ZX_4 + \\ &\quad 0.374ZX_5 + 0.15ZX_6 \\ ZF_2 &= -0.166ZX_1 - 0.274ZX_2 + 0.116ZX_3 - \\ &\quad 0.298ZX_4 + 0.414ZX_5 + 0.789ZX_6 \end{aligned} \quad (17)$$

其中, ZX_1 、 ZX_2 、 ZX_3 、 ZX_4 、 ZX_5 、 ZX_6 分别为标准化以后的旅客周转量、人口数、民用汽车拥有量、货运周转量、公路面积密度、人均 GDP; ZF_1 、 ZF_2 分别为新的综合交通情况、经济情况指标。

运用 ZF_1 、 ZF_2 作为新的综合指标进行层次聚类分析。首先将每个城市单独看作一类,利用式(10)计算其离差平方和。尝试将类 C_i 和类 C_j 合并成新类 C_h ,利用式(11)计算新类的离差平方和 G_h 。定义类 C_i 和类 C_j 之间的平方距离为:

$$U_{ij}^2 = G_h - (G_i + G_j) \quad (18)$$

以各类之间相对距离的大小为横轴,以全国各省市为纵轴,在某距离下若有 2 类可以合并成一个新类,则将该 2 类在此距离下用一竖线连接,这样就可以得出聚类过程树状图。省市聚类结果树状图如图 2 所示。

根据树状图可以方便地了解指定聚类个数的分

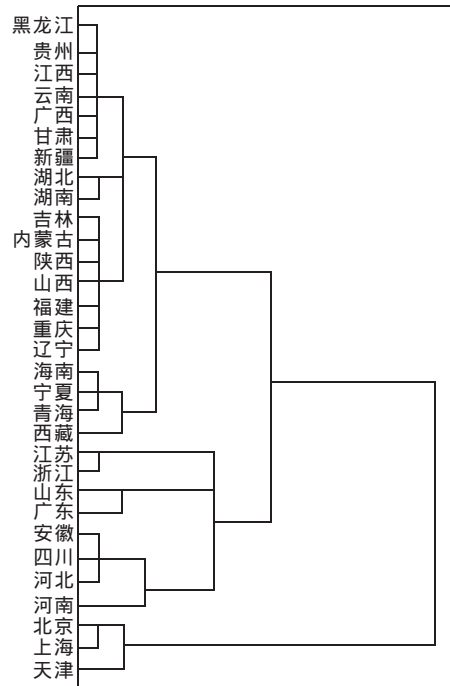


图 2 层次聚类的系统树状图

Fig.2 Dendrogram for hierarchical clustering

类结果。通过树状图看分类结果,只需在树状图上画一竖直虚线,将与虚线相交的线断开,断线后仍然连接的城市则分为一类,虚线的位置则表示分类的距离尺度。从树状图中可以看出聚类结果分成 3 类比较合适,所以用一条竖线将图中只有 3 条横线地方断开。断开后,仍然连接的则分为一类,聚类结果如表 4 所示。

表 4 聚类结果

Table 4 Results of clustering

地区	类别	地区	类别	地区	类别
辽宁	3	江苏	2	内蒙古	3
吉林	3	浙江	2	湖北	3
黑龙江	3	福建	3	湖南	3
北京	1	广东	2	江西	3
天津	1	海南	3	安徽	2
河北	2	陕西	3	云南	3
山东	2	山西	3	贵州	3
上海	1	河南	2	四川	2
重庆	3	甘肃	3	宁夏	3
广西	3	青海	3		
新疆	3	西藏	3		

从表 4 所示的聚类结果中可以看出,可以划分为如下 3 类。

第 1 类:公路交通经济发达地区,包括北京、天津、上海 3 个直辖市。这 3 个地区的交通便利,经济发达,且举办政治影响较大的活动,对电动汽车充电站的需求大、对充电的便利性要求较高, α 取值应在参考建议范围内取较小的值。

第 2 类:公路交通经济中等发达地区,包括河北、山东、江苏、浙江、广东、河南、安徽和四川 8 个省。这

些地区交通较为便利,经济发展也较快,具有较好的发展潜力,但经济力量相比于第一类别的地区略显薄弱, α 取值应在参考建议范围内取值适中。

第 3 类:公路交通经济初等发达地区,包括 20 个省市自治区。这些地区有些地方经济薄弱,有些地区公路交通不发达。电动汽车充电站设计规划时,考虑经济性多一些, α 取值应在参考建议范围内取较大的值。也可进一步采用聚类分析的方法,将其进一步细化。

1.3 电动汽车充电站选址的数学模型

根据 Voronoi 图原理,将城市的电动汽车负荷全部集中到城市道路的路口。如图 3 所示,将标号为 6 的区域的负荷做集中处理,看成标号为 6 的点的负荷。这样电动汽车充电的行驶距离就变为所在区域的交通路口到候选充电站址的距离。

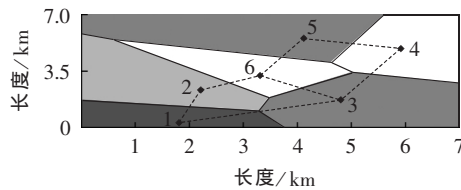


图 3 负荷集中处理

Fig.3 Load concentration

为保障电动汽车的行驶能力、满足电动汽车车主的出行需要,从城市任意位置出发距最近的充电站的距离应小于等于 l , 这就是集覆盖问题。集覆盖问题最早由 Toregas (1971 年)^[23] 提出, 满足覆盖所有需求点的前提下, 使得总的建设服务站个数最少。集覆盖问题最早被提出是用于解决消防中心和救护中心的选址问题。

充电站选址直接关系到充电站建设成本, 所以充电站选址需要在满足约束的前提下使充电站建设数量尽可能少。约束条件为: 从每个交通路口出发到相邻的最近的充电站的距离 $d \leq l$, 为了避免资源的浪费, 相邻两充电站之间距离不能太近, 为此相邻两充电站距离需满足:

$$l \leq A \leq L/2 \quad (19)$$

其中, A 为相邻两充电站之间的距离; L 为电动汽车的续驶里程。

则充电站建设选址的模型为:

$$\begin{aligned} & \min(\text{length}(N)) \\ & \begin{cases} \min(d_{ij}) \leq l & \forall i \in N, j \in M \\ \min(d_{it}) \leq L/2 & \forall i, t \in N \end{cases} \end{aligned} \quad (20)$$

其中, $\text{length}(\cdot)$ 表示求集合长度函数; N 为充电站建设节点集; M 为非充电站的负荷节点集; L 为电动汽车续驶里程; d_{ij} 为任意充电站建设节点与非充电站建设节点间的距离; d_{it} 为任意两充电站建设节点间距离。

前文描述的距离显然是沿道路实际行驶的距

离, 而不是地图上两点之间的直线距离。为此, 需要研究电动汽车去充电过程中在道路行驶的路程。从某一充电负荷节点出发, 到达某一充电站有多条路径可供选择。因此需要计算出对任一充电负荷节点与备选充电站址之间的最短路径。Floyd 算法可以得到网络中不经过中间节点, 或者最多允许经过 $2^w - 1$ 个中间节点时的最短路径 d_{ij} , 其中 w 为网络中总的节点个数。

选定充电站的位置后, 根据 Voronoi 图计算出每个充电站所服务的充电负荷节点覆盖的面积。假设城市的人口均匀分布, 根据该城市的人口密度和电动汽车的占有率, 求得该充电站所服务的电动汽车的数量, 进而计算出每个充电站所配置充电机的数量, 最后按照所配充电机情况计算充电站配置容量。充电站一般配置常规充电机和快速充电机 2 类。常规充电机一般在 5~10 h 将电动汽车充满电, 由于充电时间较长, 车主一般不会在充电站等待; 快速充电一般在 10~30 min 充满 80% 的电量, 一般用于应急充电, 车主一般在充电站等待。由于应用场景不同, 充电机数量配置原理也不相同。常规充电机数量按照充电时间进行配置, 快速充电机的数量由排队论的理论来解决。

目前, 电动汽车常规充电以恒流/恒压两阶段充电方法为主, 忽略充电过程中充电起始和结束阶段, 将充电过程简化为恒功率充电。常规充电机数量按照下式进行配置:

$$R_i = \frac{V_i n_{\text{cha}} \omega_i T}{t_0} \quad (21)$$

其中, R_i 为第 i 个充电站配置的常规充电机的个数; n_{cha} 为每辆车每天平均充电次数; ω_i 为每天到第 i 个充电站进行充电的电动汽车采用常规充电方式的比例; T 为常规充电方式的平均充电时间; t_0 为充电站常规充电机的每日工作时间。

对于快速充电机的数量配置, 从车主的角度考虑, 希望充电机越多越好, 这样可以减少等待时间; 从充电站的运营方角度看, 无条件地增加充电机的数量会带来建设、运行成本的大幅度增长。为此, 根据排队论的理论对充电站内快速充电机的数量进行优化。根据式(9)计算每个充电站快速充电排队时长的期望值, 用最少的充电机数量, 满足车主期望排队等待时间不超过 T_0 的要求。

充电站内充电机输入总容量为:

$$S_{\Sigma} = K \left(\frac{p_1}{\eta_1 \cos \varphi_1} + \frac{p_2}{\eta_2 \cos \varphi_2} + \cdots + \frac{p_k}{\eta_k \cos \varphi_k} \right) \quad (22)$$

其中, S_{Σ} 为充电站配置的总容量; K 为充电机同时系数; p_k 、 η_k 、 $\cos \varphi_k$ 分别为第 k 台充电机的功率、充电效率、功率因数。

2 算法描述

2.1 最短路径算法描述

Floyd 算法如下^[24]。

第一步,作初始距离矩阵 $D^{(0)}$,其中如果从节点 i 到节点 j 之间有路可达,则 $d_{ij}^{(0)}$ 为两点之间的道路长度,否则 $d_{ij}^{(0)}$ 为无穷,表示两点之间不直接相通。即:

$$d_{ij}^{(0)} = \begin{cases} w_{ij} & i, j \text{ 相邻} \\ \infty & i, j \text{ 不相邻} \end{cases} \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (23)$$

其中, d_{ij} 为节点 i 与节点 j 之间的距离; w_{ij} 为直接相连的节点 i 与节点 j 之间的直连距离。

第二步,对于每一对顶点 i 与 j ,看是否存在一个顶点 r ,使得顶点 i 到顶点 r 再到顶点 j ,比已知路径更短。即构造迭代矩阵 $D^{(k)}$,其元素为:

$$d_{ij}^{(k)} = \min(d_{ir}^{(k-1)} + d_{rj}^{(k-1)}) \quad r = 1, 2, \dots, n \quad (24)$$

第三步,若 $D^{(k+1)} = D^{(k)}$,表明最小距离已经找到,则迭代终止;否则,返回第二步。

2.2 充电站位置选取的算法描述

设 $X_i^{(e)}$ 为充电站建设与否的决策变量,取值只有 0 和 1。 $X_i^{(e)} = 1$ 表示在节点 i 建设充电站, $X_i^{(e)} = 0$ 表示在节点 i 不建设充电站。

a. 初始化, $X_i^{(e)} = 1 (i = 1, 2, \dots, n; e = 1)$ 。

b. $X_k^{(e)} = 1 (k = 1)$,即在节点 k 处建设充电站。则在通过 Floyd 算法计算出的最短距离矩阵 D 中距离节点 k 在 l 之内 ($d_{ik} < l (i = 1, 2, \dots, n; k = 1)$) 的节点 i 将不再建设充电站,即 $X_i^{(e)} = 0 (i = 1, 2, \dots, n; i \neq k)$ 。

c. 若 $X_i^{(e)} = 1 (i = 1, 2, \dots, n; e = 1)$,则距节点 i 在 l 之内 ($d_{ij} < l (i, j = 1, 2, \dots, n; e = 1)$) 的节点 j 将不再建设充电站,即 $X_j^{(e)} = 0 (j \neq i; e = 1)$ 。

d. $e = e + 1$,重新执行步骤 c,直到 $e = n$ 。

e. 检验约束条件 $l \leq A \leq L/2$ 是否得到满足,即 $\min(d_{ij}) \leq L/2 (\forall X_i = 1, X_j = 1)$,若不满足,则 $X_p^{(e)} = 1 (p \neq i, e \neq j, d_{ip} \leq S/2, d_{pj} \leq L/2)$ 。

f. 记录 $X^{(e)}$,改变初始 e 的值重新执行步骤 a—e。

g. 选出最小的 $X^{(k)}$ 即为最优备选方案。

下面证明上述算法一定可以得到全局最优解。如果上述方法得到的最优解 $X^{(k)}$: $X_i^{(k)} = 1, X_j^{(k)} = 1, X_u^{(k)} = 0 (i \neq j \neq u)$,即在节点 i 与节点 j 建设充电站,而在节点 u 不建设充电站。假设存在另外一个解 X 在节点 u 需要建设充电站,而在节点 i 与节点 j 不需要建设充电站,其他节点充电站建设情况与最优解 $X^{(k)}$ 相同,即 X 满足 $X_u = 1, X_i = 0, X_j = 0, X_m = X_m^{(k)} (m \neq i, j, u)$ 。由步骤 b 可知,在每次 k 的循环中 $X_k^{(k)} = 1$ 。因为 $X_u = 1$,由上述迭代步骤可知,在 $X_u = 1$ 的所有解中 $X^{(u)}$ 是最优解,所以 X 一定不比 $X^{(u)}$ 更优。而 $X^{(k)}$ 是 $X^{(u)}$ ($u = 1, 2, \dots, n$) 中最优的,所以 X 一定不比 $X^{(k)}$ 更优,因此假设不成立,从而得证 $X^{(k)}$ 是最优解。

2.3 充电站设计容量计算

计算最优备选方案中每个充电站所服务的的小的 Voronoi 图的面积:

$$S_i = \sum S_{\text{Voronoi},ij} \quad d_{ii} \leq l, i \in N, j \in M \quad (25)$$

其中, $S_{\text{Voronoi},ij}$ 为第 j 个 Voronoi 图的面积。

对于同时可以被多个充电站所服务的小 Voronoi 图,由可以为其提供服务的充电站将其面积均分。

则第 i 个充电站所服务的电动汽车的数量:

$$N_i = \frac{N_0 \xi S_i}{\sum S_i} \quad (26)$$

其中, N_0 为城市汽车总量; ξ 为电动汽车保有量,以百分数表示; S_i 为第 i 个电动汽车充电站所服务的区域面积。

每辆车平均充电次数:

$$n_{\text{cha}} = \frac{k_1 k_2}{q} \quad (27)$$

其中, k_1 为电动汽车每 100 km 综合损耗; k_2 为电动汽车平均日行驶里程; q 为每辆电动汽车充电量。

根据式 (26)、(27) 计算每天到第 i 个充电站充电的电动汽车的充电车次,再根据式 (21) 计算常规充电机配置台数,根据式 (9) 计算满足等待时间约束的快速充电机的配置台数,最后根据式 (22) 计算充电站的容量。

3 算例验证

为验证本文方法的有效性,采用某市主城区实际道路系统进行测试。该市主城区共 6 个区: A、B、C、D、E、F,面积 1435 km²,城区人口 332 万,全市共有 582 个路口节点、982 条道路。交通网络如图 4 所示。

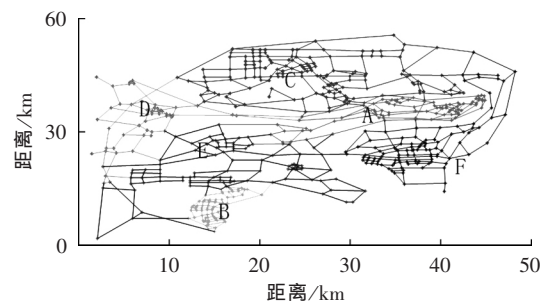


图 4 主城区交通网络示意图

Fig.4 Schematic diagram of main urban traffic network

根据 Voronoi 图原理,将城市充电负荷集中到交通路口点上,结果如图 5 所示。

目前电动汽车动力电池单次充电行驶里程在 150~300 km 之间,考虑到交通拥堵、电池老化等实际情况,续驶里程取 $L = 100$ km。根据 1.2 节的聚类结果,该城市处于第 3 类省市。为了减少充电站的建设费用,充电便捷系数取 $\alpha = 0.12$ 。首先根据 2.1 节描

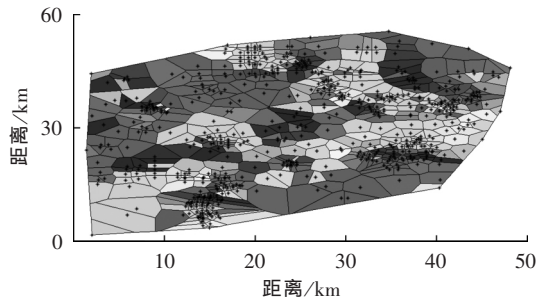


图 5 每个交通路口所服务的区域图

Fig.5 Service area for different traffic intersections

述的 Floyd 算法计算任意两路口之间的最短距离矩阵,然后按照 2.2 节所述的充电站选址算法选取充电站最优位置,最优充电站分布如图 6 所示。

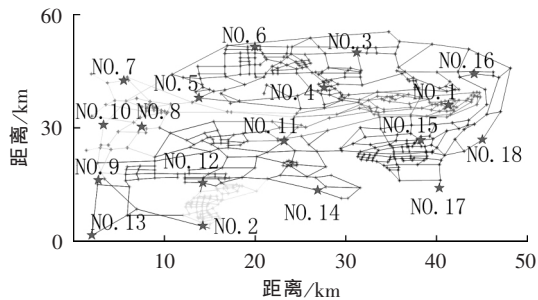


图 6 最优方案充电站分布图

Fig.6 Optimal allocation of charging stations

从图中可以明显看出:所有充电负荷节点均被覆盖,某些边缘节点只处在一个充电站的服务半径内,有的充电负荷节点同时处在 2 个充电站的服务半径之内。对于处于 2 个充电站服务区域内的充电节点,车主可以根据自己出行计划方便选取充电站点。

确定了充电站的位置后根据 Voronoi 图原理,在假设电动汽车均匀分布的前提下,计算每个充电站所服务的电动汽车数量。根据服务的电动汽车数量和需要采用快速充电的比例,计算每个充电站采用常规充电和快速充电的电动汽车数量。常规充电机的数目根据日工作时间需要满足常规充电任务来配置,快速充电机的数目根据排队理论按满足排队时间约束的最小数量来配置。在得到充电机的数量后根据式(22)计算每个充电站的容量。

根据该市规划局、市交通规划研究院发布的《2013 年市区交通发展年度报告》主城区私家小轿车拥有量达到 56.3 万辆,按照规划年电动汽车保有量达到 8%^[25]计算,电动汽车将达到 5.55 万辆。取电动汽车充电站功率因数 0.9、充电机充电效率 0.9、充电机同时系数 1;单台汽车电池容量 $q=20 \text{ kW}\cdot\text{h}$,综合电耗 $k_1=0.12 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{km}$,平均日行驶里程 $k_2=200 \text{ km}$ 。假设到达充电站的车辆 20% 采用常规充电方式,80% 采用快速充电方式。快速充电充电机的充电功率 100 kW,常规充电机的充电功率 5 kW,采用快速充电

方式的车主在充电站排队时间不超过 20 min。每个充电站所在位置、服务面积和需配置容量如表 5 所示。

表 5 最优方案各充电站配置容量

Table 5 Optimal size for different charging stations

编号	位置坐标/km	服务面积/km ²	配置容量/(kV·A)
NO.1	(41.3,35.9)	74.437	1963.00
NO.2	(13.4,4.0)	58.649	1642.00
NO.3	(31.2,49.8)	101.360	2586.40
NO.4	(27.6,40.5)	128.540	3333.30
NO.5	(13.85,37.8)	115.570	3024.70
NO.6	(20.0,51.4)	68.184	1808.60
NO.7	(5.6,42.4)	44.989	1203.70
NO.8	(7.6,30.2)	98.616	2574.10
NO.9	(2.8,16.1)	81.049	2117.30
NO.10	(3.4,30.6)	20.058	592.60
NO.11	(23.25,26.4)	143.400	3648.10
NO.12	(14.3,15.3)	121.280	3172.80
NO.13	(2.1,1.5)	21.507	598.76
NO.14	(16.9,13.3)	95.139	2432.10
NO.15	(38.25,26.7)	110.620	2876.50
NO.16	(44.1,44.2)	78.638	2104.90
NO.17	(40.3,14.0)	42.950	1197.50
NO.18	(45.0,26.8)	30.013	888.89

目前,城市 10 kV 主干线路选择 240 mm² 绝缘导线或者 300 mm² 电缆,负荷电流在 400 A 左右。因此,目前配电网供电能力可以满足所提充电站设计方案容量需求,对于容量较大的充电站可以考虑采用专线供电。

4 结语

针对电动汽车充电站规划问题,本文提出一种基于地理信息的电动汽车充电站选址和定容的方法。首先根据电动汽车的续航能力和充电便捷系数确定充电站的服务范围,结合规划年服务的电动汽车的保有量,通过两步搜索算法确定充电站的最优分布和配置容量。算例结果表明,本文提出的方法可以得到满足要求的较理想充电站规划方案,对电动汽车充电站的选址和定容具有指导意义和应用价值。

参考文献:

- [1] 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站最优规划[J]. 华北电力大学学报,2015,42(2):1-7.
ZHAO Shuqiang,LI Zhiwei. Optimal planning of charging station for electric vehicle based on PODE algorithm[J]. Journal of North China Electric Power University,2015,42(2):1-7.
- [2] 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):1678-1682.
XU Fan,YU Guoqin,GU Linfeng,et al. Tentative analysis of layout of electrical vehicle charging stations[J]. East China Electric Power,2009,37(10):1678-1682.
- [3] IP A,FONG S,LIU E. Optimization for allocating BEV recharging station in urban by using hierarchical clustering[C]//The 2nd International Conference on Data Mining and Intelligent Infor-

- mation Technology Applications(ICMIA2010). Seoul,Korea:[s.n.], 2010:460-465.
- [4] 寇凌峰,刘自发,周欢. 区域电动汽车充电站规划模型与算法[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.
- [5] 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 vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(14):53-57.
- [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. A method for electric charging infrastructure planning[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(24):36-39.
- [7] 李菱,李燕青,姚玉海,等. 基于遗传算法的电动汽车充电站的布局规划[J]. 华东电力,2011,39(6):1004-1006.
- LI Ling,LI Yanqing,YAO Yuhai,et al. Layout planning of electric vehicle charging stations based on genetic algorithm[J]. East China Electric Power,2011,39(6):1004-1006.
- [8] 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(5):1-8.
- 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(5):1-8.
- [9] 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.
- [10] 葛少云,冯亮,刘洪,等. 考虑车流信息与配电网容量约束的充电站规划[J]. 电网技术,2013,37(3):582-589.
- GE Shaoyun,FENG Liang,LIU Hong,et al. Planning of charging stations considering traffic flow and capacity constraints of distribution network[J]. Power System Technology,2013,37(3):582-589.
- [11] 唐现刚,刘俊勇,刘友波,等. 基于计算几何方法的电动汽车充电站规划[J]. 电力系统自动化,2012,36(8):24-30.
- TANG Xiangang,LIU Junyong,LIU Youbo,et al. Electric vehicle charging station planning based on computational geometry method[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(8):24-30.
- [12] 周洪超,李海峰. 基于博弈论的电动汽车充电站选址优化模型研究[J]. 科技和产业,2011,11(2):51-54.
- ZHOU Hongchao,LI Haifeng. Optimization model of electric vehicle charging station siting based on game theory[J]. Science Technology and Industry,2011,11(2):51-54.
- [13] 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.
- [14] 黄小庆,杨夯,肖波,等. 考虑客户满意度的电动汽车充电站运营状态评估[J]. 电力自动化设备,2014,34(10):96-101.
- HUANG Xiaoqing,YANG Hang,XIAO Bo,et al. Operating state evaluation considering customer satisfaction for electric vehicle charging station[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(10):96-101.
- [15] 陈清泉,孙逢春,祝嘉光. 现代电动汽车技术[M]. 北京:北京理工大学出版社,2004:18-24.
- [16] 葛少云,冯亮,刘洪,等. 考虑电量分布及行驶里程的高速公路充电站规划[J]. 电力自动化设备,2013,33(7):111-116.
- GE Shaoyun,FENG Liang,LIU Hong,et al. Planning of charging stations on highway considering power distribution and driving mileage[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(7):111-116.
- [17] 熊虎,向铁元,祝勇刚,等. 电动汽车公共充电站布局的最优规划[J]. 电力系统自动化,2012,36(23):65-70.
- XIONG Hu,XIANG Tiejuan,ZHU Yonggang,et al. Electric vehicle public charging stations location optimal planning[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(23):65-70.
- [18] 薛毅,耿美英. 运筹学实验[M]. 北京:电子工业出版社,2008:426-447.
- [19] 包研科. 数据分析教程[M]. 北京:清华大学出版社,2011:9.
- [20] 丁世飞,勒奉祥,赵相伟. 现代数据分析与信息模式识别[M]. 北京:科学出版社,2012:60-68.
- [21] 金相郁. 中国区域划分的层次聚类分析[J]. 城市规划会刊,2004(2):23-28.
- [22] 马逢时,吴成鸥,蔡霞. 基于 MATLAB 的现代实用统计[M]. 北京:中国人民大学出版社,2013:106-112.
- [23] TOREGAS C,SWAIN R,REVELLE C,et al. The location of service facilities[J]. Operation Research,1971,19:1363-1373.
- [24] 张德全,吾果林. 最短路问题的 Floyd 算法优化[J]. 许昌学院学报,2009,28(2):10-13.
- ZHANG Dequan,WU Guolin. Optimization of Floyd algorithmic for shortest path problem[J]. Journal of Xuchang University,2009,28(2):10-13.
- [25] 刘焕. 电动汽车充电站建设项目群风险研究[D]. 重庆:重庆大学,2009.
- LIU Huan. Study on the risk of construction projects in the electric vehicle charging stations[D]. Chongqing:Chongqing University,2009.

作者简介:



赵书强

赵书强(1964—),男,河北景县人,教授,博士研究生导师,博士,主要从事电力系统分析与控制、电力系统规划与可靠性等方面的教学与科研工作(E-mail:zsqli@163.com);

李志伟(1989—),男,河北饶阳人,博士研究生,主要研究方向为智能配电网与电动汽车(E-mail:yufengli2011@126.com);

党磊(1991—),男,陕西渭南人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统分析、运行与控制(E-mail:dang358262988@163.com)。

(下转第 23 页 continued on page 23)

ZHU Yongsheng, WANG Jie, QU Boyang, et al. Multi-objective dynamic economic emission dispatching of power grid containing wind farms[J]. Power System Technology, 2015, 39(5): 1315-1322.

[18] LI H, ZHANG Q. Multiobjective optimization problems with complicated Pareto sets, MOEA/D and NSGA- [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2009, 13(2): 284-302.

[19] BASU M. Dynamic economic emission dispatch using nondominated sorting genetic algorithm- [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2008, 30(2): 140-149.

[20] 王彩霞, 乔颖, 鲁宗相, 等. 低碳经济下风火互济系统日前发电计划模式分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(22): 111-117.

WANG Caixia, QIAO Ying, LU Zongxiang, et al. Day-ahead dispatch mode for wind thermal power system in low-carbon economy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 111-117.

作者简介:



朱永胜

朱永胜(1980—),男,河南郑州人,讲师,博士研究生,研究方向为电力系统优化运行(E-mail:zhuysdy@163.com);

王杰(1959—),男,河南周口人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为智能计算与智能控制(E-mail:wj@zzu.edu.cn);

瞿博阳(1984—),男,河南焦作人,副教授,博士,研究方向为进化计算、模式识别、

运筹学理论(E-mail:qby1984@hotmail.com);

李健(1960—),男,河南开封人,高级实验师,研究方向为电力系统规划、运行(E-mail:lj@zzti.edu.cn);

SUGANTHAN P N(1967—),男,澳大利亚斯里兰卡人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为进化计算、模式识别、群体智能(E-mail:epnsugan@ntu.edu.sg)。

Dynamic environmental and economic dispatch of power system with EVs

ZHU Yongsheng^{1,2}, WANG Jie¹, QU Boyang², LI Jian², SUGANTHAN P N³

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. School of Electronic and Information Engineering, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China;

3. School of Electrical and Electronic Engineering, Nanyang Technological University, Singapore 639798)

Abstract: A dynamic environmental and economic dispatch model including EVs(Electric Vehicles) is constructed to cope with the challenge brought by the large-scale EV application to the power dispatch, which takes the V2G(Vehicle to Grid) power and the conventional generator outputs of each dispatch period as the decision variables, takes the total fuel cost and the pollution emission as the optimization objectives, and dynamically manages the charging/discharging behaviour of EVs to meet the demands of system energy and user travel. An improved MOEA/D is designed to solve the optimal dispatch model and a strategy based on the penalty function is proposed to dynamically process the constraints of decision variables in two steps. The rationality and effectiveness of the proposed model and method are verified by the simulative results of a test system.

Key words: electric power systems; electric vehicles; dynamic environmental and economic dispatch; MOEA/D; multi-objective optimization

(上接第 15 页 continued from page 15)

Optimal EV charging station siting and sizing based on urban traffic network information

ZHAO Shuqiang, LI Zhiwei, DANG Lei

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: An analysis method based on two-step search is given for planning the site and size of EV (Electric Vehicle) charging station, for which, an optimal mathematical model is proposed. The optimal allocation of EV charging stations is obtained based on the information of urban roads, the Voronoi diagram is applied to divide the service areas for EV charging stations, and the size of each station is designed according to its charging load. Case analysis verifies the effectiveness and practicability of the proposed method.

Key words: electric vehicles; charging station; cluster analysis; set covering; charging station siting; charging station sizing; optimization