

区域电动汽车充电站规划的模型与算法

寇凌峰, 刘自发, 周 欢

(华北电力大学输配电研究所, 北京 102206)

Modeling Algorithm of Charging Station Planning for Regional Electric Vehicle

Kou Lingfeng, Liu Zifa, Zhou Huan

(Power Transmission and Distribution Research Institute, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

摘 要: 合理确定电动汽车充电站的规模及位置, 建立了一种电动汽车充电站选址定容的最优费用模型。模型以居民负荷的分布情况模拟电动汽车的数量, 用层次分析法给出候选站址的权系数, 在候选站址与变电站的距离、电动汽车充电站的安装费用、电动汽车数量等条件的约束下, 目标函数还加入了充电站的运行费用、网损费用和充电站配电变压器的投资。模型中电动汽车充电电价采用实时电价。为验证模型的有效性, 采用粒子群算法对一假设算例进行优化求解, 结果表明该模型具有一定的可行性。

关键词: 电动汽车; 充电站; 实时电价; 层次分析法; 权系数; 居民负荷

Abstract: In order to determinate reasonable scale and location of charging station for electric vehicle, the optimization cost model of locating and sizing of charging station for electric vehicle is built. The model simulates the number of electric vehicle based on the distribution of residents and the weight of candidate address is determined by using of Analytic Hierarchy Process (AHP). This proposed model includes constraints such as the distance between the substation and candidate address, installed cost of charging station for electric vehicle, the number of electric vehicle, and so on. Such variables as running cost of charging station, network loss cost and transformers investment, etc., are introduced in objective function. Charging price of electric car is real-time electricity pricing. The simulation is carried out on a test example by using particle swarm optimization algorithm, and the results show that the model is effective and feasible.

Key words: electric vehicle; charging station; real-time electricity pricing; AHP; weights; load

0 引 言

建设电动汽车充电站是电动汽车普及的前提和基石。在拓展电力市场需求的同时, 完善高效的能

源供给网络是电动汽车广泛应用的必要条件之一。

文献 [1] 介绍了我国电动汽车充电站的发展现状、提出影响电动汽车充电站规划的因素和电动汽车规划中的原则。文献 [2] 对电力供应商、电动汽车充电站运行商、电动汽车用户三方分别给出利益敏感模型, 并从中寻求与充电电价相关的主要因素。然后通过博弈分析比较, 对政府、使用者和充电方(电力供应商和电动汽车充电站运行商组成)共同形成的三方博弈分别进行比较分析, 均衡三方各自利益取向, 得出了三方均可接受的充电电价浮动区间, 从而为电动汽车的推广提供一定的决策依据。文献 [3] 假设至 2015 年加州将存在 1 000 000 辆混合动力电动车以及纯电动汽车, 在充分考虑可再生能源发电下, 以节能降耗为目标建立了线性和非线性模型。文献 [4] 从接口技术和材料的角度提出电动汽车快速充电机可提供的电压及电流为: 600V d c 400 A. 和 690V a c 250 A。文献 [5] 中混合动力电动汽车的最大容量为 25kWh。本文假设电动汽车平均容量为 50kWh, 标准充电电压为 400 V d c, 充电电流为 240A。

本文为满足配网负荷要求和电动汽车用户的充电需求, 将规划区分为多个区域, 在每个区域内给出充电站各候选站址的权系数, 以电动汽车充电站营运的实际收益为目标建立优化模型, 通过计算确定每个区域的最优站址和规模, 最终得到整个规划区电动汽车充电站的规划方案。

1 区域电动汽车数量模型

1.1 空间负荷预测

负荷预测是对历史和现状负荷资料进行充分收集、整理, 分析历史发展规律, 用切合实际的科学方法预测未来负荷的发展。

空间负荷预测就是把土地按性质分成若干地块,再把地块用地性质转化为地块用电负荷。从数学角度来讲,空间负荷预测及其计算存在如下3种映射:

$$F(x, y) \xrightarrow{f_1} L(x, y) \xrightarrow{f_2} S(x, y) \xrightarrow{f_3} S_t \quad (1)$$

式中: $F(x, y)$ 为地块特征。 $L(x, y)$ 为土地使用面积, $S(x, y)$ 为土地负荷, S_t 为地块的总负荷^[6]。本文按负荷预测模型来确定居民负荷分布的位置及数量。

1.2 区域划分及各区域电动汽车数量计算

假设规划区的电动汽车总量为 N , 平均每天有充电需求的电动汽车为总量的 1%, 则规划区电动汽车充电站数量为

$$N_{\text{charge}} = \frac{N \times 1\% \times 50}{n\beta \times 24} \quad (2)$$

式中: β 为单台充电机的平均功率; n 为常规充电站充电机数量, 一般为 6 台。

根据充电站数量, 用等面积法将规划区划分为 N_{charge} 个区域, 每个区域建一个充电站。由于每个区域的居民负荷不同, 所以电动汽车数量会有一定的差异。倘若电动汽车充电站建设规模一致, 势必造成资源浪费或者供不应求。

各区域电动汽车数量由式 (3) 确定

$$N_{\text{car}, i} = \frac{S_i}{S} \times N, i = 1, 2, \dots, N_{\text{charge}} \quad (3)$$

式中: S 为规划区的居民总负荷; S_i 为第 i 个区域的居民负荷; S 和 S_i 均根据空间负荷预测模型得到。居民负荷直接反映了居民数量和经济生活水平, 故本文选取居民负荷作为参考。

2 确定站址权系数

系统工程理论中的层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 是一种常用的权重确定方法, 是把复杂问题中的各个因素划分成相关联的有序层次, 使之条理清晰化的多目标、多准则的决策方法, 是一种结合定量分析与定性分析的有效方法^[7]。

考虑到充电站候选场所模型存在着变量繁多、结构复杂、不确定性因素作用显著等特点, 难以给出准确的数学模型。传统方法对于复杂对象系统的评判必然涉及多个复杂因素, 很难定出各因素的权系数, 即很难真实反映各因素在整体中的地位, 本文用层次分析法 (AHP) 引入人为因素来给出建设

电动车充电站的可实施程度, 即给出候选站址的权系数。

2.1 站址权系数影响因素集确定

确定站址权系数时, 考虑了部分汽车加油站需要考虑的因素和部分配电网变电站的负载情况。对电动车汽车充电站从便利性、交通流量、征地代价 3 个方面考虑该充电站的可实施性权重。该问题可以分为两层: 第 1 层包括便利性、交通流量、征地代价 3 个因素, 表示为 $u = (u_1, u_2, u_3)$; 第 2 层包括 8 个因素, 分别为路口数、面积、车辆速度、车道数、道路状况、主要干道、地块费用、造成影响, 表示为 $u_1 = (u_{11}, u_{12}, u_{13})$; $u_2 = (u_{21}, u_{22}, u_{23})$; $u_3 = (u_{31}, u_{32})$, 以某区域有 3 个候选站址为例, 层次结构如图 1 所示。

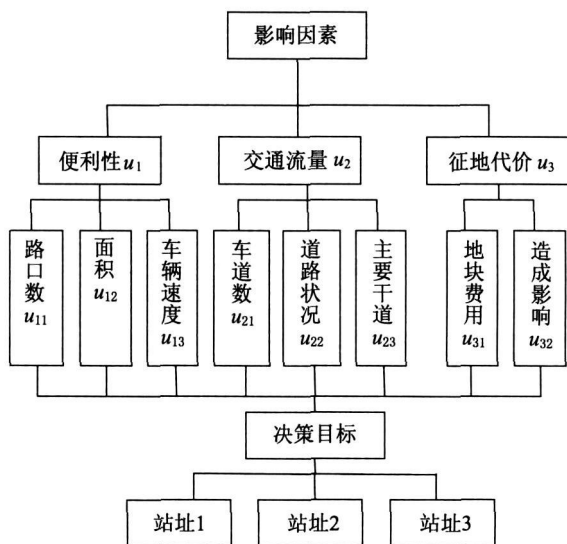


图 1 层次结构模型图

2.2 定义各层次权重

第 1 层次权重: $A = (a_1, a_2, a_3)$;

第 2 层次权重: $A_1 = (a_{11}, a_{12}, a_{13})$, $A_2 = (a_{21}, a_{22}, a_{23})$, $A_3 = (a_{31}, a_{32})$ 。

2.3 确定评语集 V

评语集是以评判者对评判对象作出的各种评价结果为元素组成的集合, 由专家依据所有影响因素和经验得出。 $V = \{v_1, v_2, v_3\}$, v_1 、 v_2 、 v_3 分别为对站址 1、2、3 所作评价。

2.4 确定模糊判断矩阵

确定各个评价因素集合 u_i ($i = 1, 2, 3$) 对评语集 V 的关系矩阵, 如: 决定便利性的各评价因素可组成模糊评判矩阵。

$$R_1 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & r_{m3} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中： m 是评价因素的总数，此处便利性项目 $m=3$ ； r_{ij} 表示评价因素 u_i 对评价对象 v_j 的隶属关系。

2.5 确定各性能因素和各评价因素的权重集

① 构造判断矩阵。判断矩阵指的是相同层次间各个因数的相对重要性矩阵，本文只给出第 1 层的判断矩阵

T	u_1	u_2	u_3
u_1	1	3	4
u_2	1/3	1	2
u_3	1/4	1/2	1

② 由判断矩阵即可得第 1 层的权系数 A ，同理可得第 2 层的权重 A_1, A_2, A_3 。

2.6 用两层模糊综合评判法^[7] 给出最优站址权系数

$$B = (a_1, a_2, a_3)$$

本节得出的站地权系数将作为电动汽车充电站收益系数，从而直接影响电动汽车充电站的收益。

3 电动汽车充电站新模型

以投运至目标年最大化充电站运营收益作为目标，考虑充电站的安装费用、维护费用等，建立优化模型。

电动汽车充电站的初期安装费用 C_1 ，充电站运行维护费用 C_2 ，充电站运行时网损费用 C_3 ，充电站实际运行时的收益 C_4 ，该电动汽车充电站投入运行至目标年实际效益为

$$W_{\max} = C_4 - C_1 - C_2 - C_3 \quad (5)$$

初期安装费用

$$C_1 = (m_1 a + n_1 b + c) \frac{r_0(1+r_0)^z}{(1+r_0)^z - 1} \quad (6)$$

式中： m_i 指的是充电站 i 应上的配电变压器数量； a 为该容量配电变压器的价格； n_i 指的是充电站 i 应该上的充电机数量； b 为单位充电机的价格； c 为其他固定费用， r_0 是投资回收率； z 为运行年限。充电站的固定费用是指建设电动汽车充电站一期投入的费用(除去配电变压器和充电机的费用)。

单个充电站从建成运行至目标年运行维护成本费用 C_2 包括充电站维护费用、材料费用、人员工资等。投运至目标年的运行费用可以折算为初期的投资费用，设折算系数 α ，则有

$$C_2 = (m_1 a + n_1 b + c)(1 + \alpha) \quad (7)$$

充电网损 C_3 由式(8)计算：

$$\begin{cases} C_3 = C_{31} + C_{32} \\ C_{31} = m_i (C_{L1i} + C_{L2i}) \\ C_{32} = s(nN_{car,j}\beta)^2 D_i \end{cases} \quad (8)$$

式中： C_3 包括 C_{31} (充电站侧配电变压器的损耗费用)和 C_{32} (变电站到充电站的线损费用)； C_{L1i} 和 C_{L2i} 分别为配电变压器的铁耗费用、铜耗费用； D_i 为站址 i 到变电站的馈线长度； β 为单台充电机的平均功率； n 为区域内电动汽车充电率； $N_{car,j}$ 第 j 个区域电动汽车数量； s 为线损费用折算系数。

本文考虑的收益方为建设电动汽车充电站的电网公司，电网公司可以掌握实时电网负荷情况，本文电动汽车充电定价方式是基于电网负荷变化情况的。电价

$$Z_t = \frac{S_{\text{total}} P_t}{M} \gamma \quad t = 1, 2, \dots, 24 \quad (9)$$

式中： P_t ($t=1, 2 \dots 24$) 为供电公司的实时商业用电电价； M 为历史最大负荷； S_{total} 为实时负荷； γ 为比例调整因子。

将式(6)~(9)代入式(5)，整理可以得到单个充电站收益最大化模型

$$W_{\max} = z a_i \sum_{t=1}^{24} \left[\frac{P_t S_{\text{total}}}{M} \gamma - C_d \right] n N_{car,j} - (m_1 a + n_1 b + c) \frac{r_0 (1+r_0)^z}{(1+r_0)^z - 1} - (m_1 a + n_1 b + c)(1 + \alpha) - [m_i (C_{L1i} + C_{L2i}) + (n \sum_{(x,y)} N(x,y)\beta)^2 D_i] z \quad (10)$$

式中： a_i 为该变电站所占地块(站址)权系数； C_d 为上网电价。

约束条件：

$$\begin{aligned} \rho_{m_i} \cos \varphi + S_{\text{total}} &\leq M \\ n_i \beta &\leq \theta m_i \cos \varphi. \end{aligned}$$

4 基于粒子群算法的优化设计

电动汽车充电站优化采用二次非线性模型，利用粒子群算法^[8] 求得最优值，设 $z_i = (z_{i1}, z_{i2}, \dots, z_{iD})$ 为第 i 个粒子($i=1, 2, \dots, m$)的 D 维位置矢量，根据事先设定的适应值函数计算 z_i 当前的适应值，即可衡量粒子位置的优劣； $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$ 为粒子 i 的飞行速度，即粒子移动的距离； $p_i = (p_{i1}^n, p_{i1}^g, \dots, p_{iD}^n, \dots, p_{iD}^g)$ 为粒

子搜索到的最优位置； $p_g = (p_{g1}, p_{g1}, \cdots, p_{gd}, \cdots, p_{gD})$ 为整个粒子群搜索到的最优位置。

在每次迭代中，粒子根据式(1)、(2)更新速度和位置：

$$v_{id}^{k+1} = v_{id}^k + c_1 r_1 (p_{id}^k - z_{id}^k) + c_2 r_2 (p_{gd}^k - z_{id}^k) \quad (11)$$

$$z_{id}^{k+1} = z_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (12)$$

式中： $i = 1, 2, \cdots, m$ ； $d = 1, 2, \cdots, D$ ； k 是迭代次数； r_1 和 r_2 为 $[0, 1]$ 上的随机数，用来保持群体的多样性； c_1 和 c_2 为学习因子，也称加速因子，能使粒子具有自我总结和向群体中优秀个体学习的能力，从而向自己的历史最优优点以及群体内历史最优优点靠近。

粒子速度 v_{id} 选取需要满足 $v_{\min} \leq v_{id} \leq v_{\max}$ ，位置 z_{id} 的取值范围为 $z_{\min} \leq z_{id} \leq z_{\max}$ 。式(11)粒子根据它上一次迭代的速度、它当前位置和自身最好经验与群体最好经验之间的距离来更新速度，然后粒子根据式(12)飞向新的位置。

5 算 例

假设常规电动汽车充电站配套 6 台充电机，每台充电机功率为 96kW，一台容量为 630kV A 的配电变压器（本文暂不考虑对配电网电能质量的影响）。某规划区共 400km²，在规划年居民负荷总量为 2.6MW，由其经济发展指标可以预计规划年的民用电动汽车总量为 50 万辆，电动汽车充电的概率在负荷低谷时刻以 100%计，负荷高峰时刻以 60%计，模型计算均采用典型日负荷，如图 2 所示。计算所取参数值如表 1 和表 2 所示。

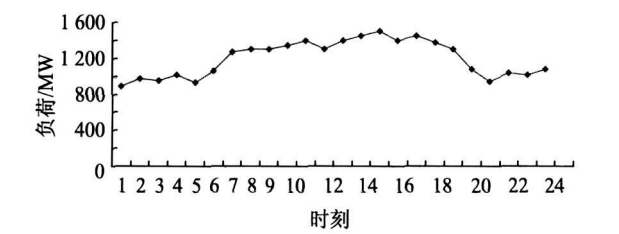


图 2 典型日负荷曲线

表 1 配电变压器价格

标号	容量/kVA	元/台	铜耗/kW	铁耗/kW
1	200	36 320	1.8	4.1
2	315	50 000	2.9	6.1
3	630	77 500	3.8	10.2

表 2 参数取值表

标号	名称	参数值	标号	名称	参数值
1	r_0	0.1	7	α	0.2
2	z	20	8	P_t	0.68
3	$\cos \varphi$	0.92	9	r	1.3
4	β	96	10	M/MW	12
5	$c_d/\text{元}$	0.38	11	ρ/kW	315
6	n	0.01			

计算步骤如下：

① 根据前文方法计算可得充电站数量 $N_{\text{charge}} = 8$ ，即区域数为 8 个。各个区域电动汽车数量计算结果如表 3 所示。

表 3 各个区域电动汽车数量

区域号	居民负荷/MW	电动汽车数量/万辆	区域号	居民负荷/MW	电动汽车数量/万辆
1	0.38	7.31	5	0.363	6.98
2	0.28	5.38	6	0.355	6.83
3	0.29	5.58	7	0.352	6.77
4	0.28	5.38	8	0.3	5.77

② 以区域 1 为例，利用层次分析法给出候选站址的权系数，通过计算得出各个候选站址的收益状况。计算结果如表 4 所示。由表可知，候选站址的优劣与站址权系数有较大的关系，基本符合实际情况。候选站址 1 为区域 1 的最优站址， m_1 和 n_1 即为区域 1 内电动汽车站的最优建设规模。

表 4 区域 1 候选站址权系数及收益状况

站址(地块)号	距离/km	权系数	目标年收益/万元
1	2.5	0.5748	21.32
2	5	0.6315	21.16
3	6.6	0.5264	19.65
4	2.7	0.4748	19.5

③ 计算所有区域的充电站及各站充电机规划结果如表 5 所示。可看出规划区内 8 个区域的电动汽车充电站规模有较大的差异，说明本文提及的方法是有效的。

6 结束语

本文在考虑了交通、地理位置、配电网变电站等因素的基础上建立了最优经济模型。其中，用居

表 5 优化结果

区域 号	充电机 数量/个	充电机平均 利用率/%	区域 号	充电机 数量/个	充电机平均 利用率/%
1	9	104.1	5	7	96.7
2	6	95.5	6	7	92.3
3	5	96	7	7	104.2
4	6	100.6	8	5	104.2

民负荷分布情况模拟电动汽车的数量，可以为今后研究由电动汽车充电带来负荷预测的变化提供思路。本文通过层次分析法给出候选地址的权重，并在此基础上建立电动汽车充电站选址定容的最优经济模型，实际算例表明本文设计具有可行性。对于电动汽车充电模式多样化、充电负荷变化的影响等问题需进一步进行研究。

参 考 文 献

[1] 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.

[2] 滕耘, 胡天军, 卫振林. 电动汽车充电电价定价分析 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2008, 8 (3): 126-130.

[3] Ahmed Yousuf Saber, Ganesh Kumar Venayagamoorthy. One Million Plug-in Electric Vehicles on the Road by 2015 [C]. IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, St. Louis, MO,

USA, 2009.

[4] EN 62196-1: 2004-AUG-01, Plugs, socket-outlets, vehicle couplers and vehicle inlets-conductive charging of electric vehicles-charging of electric vehicles up to 250A a.c. and 400A d.c [S]. 2004.

[5] Parks K, Denholm P, Markel T. Costs and emissions associated with plug-in hybrid electric vehicle charging in the Xcel Energy Colorado service territory [J]. Technical Report NREL/TP-640-41410, 2007.

[6] 王颖, 彭澎. 考虑不确定性的城市电网空间负荷预测方法 [J]. 电力科学与工程, 2009, 25 (2): 24-25.

[7] 束洪春. 电力系统以可靠性为中心的维修 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 135-136.

[8] 纪震, 廖惠连, 吴青华. 粒子群算法及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2009: 16-29.

收稿日期: 2010-04-13

作者简介:

寇凌峰(1985—), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能配电网规划;

刘自发(1975—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统智能规划;

周欢(1983—), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能配电网规划。

(责任编辑: 杨秋霞)