

电动汽车充电设施规划方法

吴春阳¹, 黎灿兵², 杜力¹, 曹一家²

(1. 郑州大学电气工程学院, 河南省郑州市 450001; 2. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南省长沙市 410082)

摘要: 电动汽车作为新能源汽车的主要发展方向之一, 越来越受到人们的重视。充电设施的规划建设是电动汽车推广的重要前提。电动汽车充电设施的规划不同于变电站、加油站等服务终端的规划, 具有鲜明的特点。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, 并分析每个阶段的特点; 提出了充电方式的选择优化模型, 并基于此对各充电方式进行充电需求预测; 提出了间距比、充电容量冗余度、充电电量冗余度等概念, 以及充电设施规划的原则、流程和模型。案例分析表明了规划方法的适用性。

关键词: 电动汽车; 充电设施; 充电方式; 充电需求; 规划

0 引言

随着电池的容量和经济性不断提高, 电动汽车成为新能源汽车发展的主要方向之一。为了减少CO₂排放, 遏制全球暖化的趋势, 电动汽车的推广应用越来越受到人们的重视。中国政府大力支持新能源汽车的发展, 积极支持其配套设施建设, 并开展新能源汽车推广的示范工程^[1-2]。

国内外学者对新能源汽车技术进行了深入研究。文献[3]从能源利用和环境保护的角度对混合动力汽车进行了研究; 文献[4]介绍了国内外燃料电池汽车的开发情况; 文献[5]描述了国内电动汽车的发展方向, 研究了充电模式; 文献[6]介绍了一种新的电动汽车电池管理系统。

电动汽车充电设施也逐步引起人们的重视。文献[7-8]介绍了电动汽车充电模式及充电站规划的基本原则。因电动汽车技术尚未完全成熟, 充电需求存在很大的不确定性, 充电方式多样化^[9], 在电动汽车充电设施规划建设初期, 不宜以盈利为目的。电动汽车充电设施规划、选址方法不同于变电站、加油站、加气站等成熟领域的服务终端规划^[10-12]。文献[13]研究了电动汽车对区域电力供应的影响, 提出电动汽车充电设施规划需与配电网规划结合。另外, 电动汽车充电设施的建设亦能促进智能电网的发展^[14-15]。

中国已经在上海、深圳、北京等城市建成充电设施。国家电网公司计划于2010年在27个城市开建电动汽车充电设施^[16]; 南方电网公司也明确提出为纯电动汽车充电提供配套市场服务。

本文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, 并分析各阶段的特征; 提出充电方式的选择方法及其对应的充电需求; 研究电动汽车充电设施规划方法。

1 充电设施规划阶段划分

电动汽车发展的不同阶段, 电动汽车及动力电池技术发展水平不同, 电动汽车保有量、用户类型、行驶覆盖范围亦不同, 充电需求也具有不同的特征, 对应充电设施规划处于不同阶段。动力电池性能如质量比能量、体积比能量、充电倍率等对电动汽车充电设施发展具有重要影响。比能量决定电动汽车的续航里程(一次充电的行驶里程), 充电倍率决定充电时间。本文认为, 电动汽车推广可以分为示范、公益、商业运营等3个阶段。不同阶段充电设施规划的特征不同。

1.1 示范阶段

本阶段电动汽车技术尚未完全成熟, 有效、可持续推动电动汽车发展的市场机制还未形成, 电动汽车总量及比例极低, 而且主要以政府扶持的少数车辆为主, 比如电力工程车、垃圾清运车等, 另外, 电动汽车的行驶范围一般是指定的较小区域或指定的路线。

示范阶段的充电设施规划可视为近期规划。

1.2 公益阶段

本阶段电动汽车技术飞速发展, 但还处于较低水平, 而且存在隐性的约束瓶颈如安全因素; 本阶段电动汽车总量及比例还比较低, 经济性不高, 发展模式为依靠政府补贴、主导宣传, 可接受充电的电动汽车可以扩大到电动公交车、大型企事业单位公务用车、少数社会车辆。

本阶段的充电设施规划可视为中期规划。

1.3 商业运营阶段

本阶段电动汽车技术已经基本成熟,总量达到一定规模,而且种类比较丰富,除政府和企事业单位用车、垃圾清运车、公交电动汽车外,还包括大量的出租车和私家车,具有较大的充电需求。本阶段电动汽车经济性等同甚至超越燃油车,发展模式以市场推动为主。

本阶段电动汽车充电设施规划可视为长期规划。

2 充电方式选择及需求预测

2.1 充电方式选择

根据电动汽车行走路线或执行任务的不同,电动汽车一般分为固定线路(任务)运行车辆(如公交车、工程车、市政车辆)和随机线路运行车辆(如出租车、部分私家车)。不同类型的车辆选择充电的方法亦不尽相同。目前,电动汽车充电按大的类别分为更换电池和整车充电 2 种。

1) 更换电池

更换电池的充电方式具有一次性投入大、长期运行成本低的优势,比较适合固定线路(任务)运行车辆。

2) 整车充电

整车充电更适合随机线路运行的车辆,目前有充电站快充、充电站慢充、充电桩慢充等多种充电方式。

设充电方式有 k 种,用户最终选择何种充电方式,其充电成本是最重要的因素。对单个电动汽车,充电成本除充电收费、电池损耗折合费用外,还包括空驶的能量耗费、设备消耗(设为 c),即电动汽车为充电而绕行的非计划内路程所产生的能量耗费、设备折旧间接耗费;另外,如果充电占用的时间影响了行人的经济利益,还需考虑充电占用时间的间接耗费。设 x_i 为充电电价; q_i 为实际充电电量; μ 为该城市的出行时间价值^[17]; e_i 为平均充电功率; b_i 为电池价格; t_i 为电池寿命周期内可充电次数。则每次充电的充电费用 n_i 及单位电量充电费用 m_i 为:

$$n_i = c + x_i q_i + \mu \frac{q_i}{e_i} + \frac{b_i}{t_i} \quad (1)$$

$$m_i = \frac{n_i}{q_i} = \frac{c}{q_i} + x_i + \frac{\mu}{e_i} + \frac{b_i}{t_i q_i} \quad (2)$$

式中: i 为电动汽车的充电方式, $i=1,2,\dots,k$ 。

选择不同的充电方式,每次充电功率及电量均可能不同,故每次充电的充电费用和单位电量充电

费用可能不同;充电成本(按次计算)最低的时候,单位电量的充电费用不一定最低,故需综合考虑。综合充电费用 z_i 为:

$$z_i = \sqrt{m_i n_i s_0} h_{ii} \quad (3)$$

式中: $s_0=1 \text{ kW} \cdot \text{h}$; h_{ii} 为决策变量,若充电方式 i 可以满足电动汽车的充电需求,则 $h_{ii}=1$,否则 $h_{ii}=0$ 。

式(3)表明:从用户角度考虑,综合充电成本与单位电量充电成本和每次充电成本之积的平方根成正比。因此,用户最终所选择充电方式的综合充电成本 J 为:

$$J = \min\{z_i\} = \sqrt{m_i n_i s_0} h_{ii} \neq 0 \quad (4)$$

式(4)表明,从电动汽车用户角度,选择综合充电成本最小的充电方式为最终充电方式。

2.2 充电需求预测

设在划定的区域内,规划年电动汽车拥有量为 L ,符合充电方式 i 的汽车数量为 L_i' ,实际选择充电方式 i 的汽车数量为 L_i ,平均每辆车每天充电次数为 a_i ,则本区域内规划年不同充电方式的充电容量需求 P_i 、每天电量需求 Q_i 分别为:

$$P_i = \sum_{l=1}^{L_i} e_{il} \quad (5)$$

$$Q_i = a_i \sum_{l=1}^{L_i} q_{il} \quad (6)$$

各种充电方式的充电需求配合如图 1 所示(以充电容量为例)。

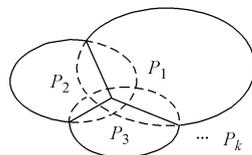


图 1 充电容量需求配合

Fig. 1 Cooperation of charging capacity demand

图 1 中含虚线的椭圆部分表示符合本充电方式的充电容量需求,实线区域 P_1, P_2, \dots, P_k 表示充电方式选择后实际的充电容量需求。

3 充电设施规划

3.1 规划原则及流程

充电设施规划应充分考虑现有电网的布局 and 规划,尽可能降低成本,并做到协调发展,具有升级空间。另外,充电设施的规划应符合城市总规划和桥路交通规划等。

多种充电方式共同满足充电需求,是电动汽车充电设施规划不同于一般供电设施规划的重要方面。建议充电设施规划流程如图 2 所示。

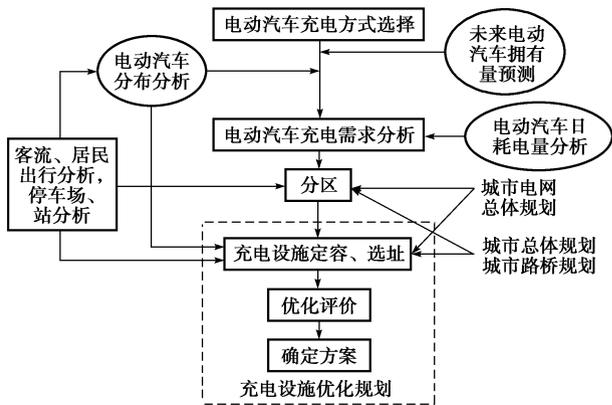


图2 电动汽车充电设施规划流程

Fig.2 Planning process for charging infrastructures

3.2 规划模型

本文采用面向充电需求的不规则分区来进行充电需求小区划分,每一分区内的充电需求用处于其几何中心的点表示。基于此,目标年充电设施位置和容量的优化问题可以用下列以投资、运行及维护成本最小为目标的模型描述:

$$\min C = \min(C_a + C_b) \quad (7)$$

式中: C 为分区总成本; C_a 为投资成本,

$$C_a = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{N_i} \left\{ F(p_{ij})_{ij} \left[\frac{r_0(1+r_0)^{y_{ij}}}{(1+r_0)^{y_{ij}} - 1} \right] \right\}$$

C_b 为运行、维护成本,

$$C_b = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{N_i} W(p_{ij})_{ij}$$

$F(p_{ij})_{ij}$ 为分区内第 j 个充电方式为 i 的充电设施建设投资费用,是充电设施建设容量 p_{ij} 的函数,其中已有的充电设施建设投资费用为0; r_0 为贴现率; y_{ij} 为分区内第 j 个充电方式为 i 的充电设施的折旧年限; N_i 为分区内充电方式为 i 的充电设施个数; $W(p_{ij})_{ij}$ 为第 j 个充电方式为 i 的充电设施的运行、维护费用。

电动汽车充电设施规划约束如下:

$$R_1 = \frac{\eta_{ij} p_{ij}}{n_{ij} e_i} \geq \rho \quad (8)$$

$$R_2 = \frac{\eta_{ij} p_{ij} T_{ij}}{\tau n_{ij} q_i} \geq \sigma \quad (9)$$

式中: R_1 为充电容量冗余度; R_2 为充电电量冗余度; $n_{ij}, \eta_{ij}, T_{ij}$ 分别为第 j 个充电方式为 i 的充电设施的可充电口数量、总体负载率、综合负载时间(取决于充电设施每天的工作时间); τ 为充电口平均每天充电次数; $i=1, 2, \dots, k; j=1, 2, \dots, N_i$ 。

式(8)和式(9)表示充电设施的容量、电量须满足充电需求,并留有裕度。因此,可得充电设施实际建设容量 P_i' 、每天电量储备 Q_i' 分别为:

$$P_i' = \sum_{j=1}^{N_i} p_{ij} = R_1 P_i \quad (10)$$

$$Q_i' = \sum_{j=1}^{N_i} q_{ij} = R_2 Q_i \quad (11)$$

另外,充电设施选址时,需考虑汽车在续航里程内遇到的充电设施达到一定数量的因素,用间距比 r (电动汽车续航里程与充电设施之间的最大距离之比)表示。设 q_0 为充电汽车的平均耗电量, d 为相邻充电设施的间距,则间距比 r 的约束如下:

$$r = \frac{q_i}{\max\{d\}} \geq \omega \quad (12)$$

电动汽车发展的不同阶段,约束作用情况也有差异,表现在式(8)、式(9)、式(12)中 ρ, σ, ω 的大小取值不同,示范阶段、公益阶段、商业运营阶段应根据实际情况逐步调整,努力使充电设施的利用率、经济效益达到最佳状态。

4 案例分析

4.1 用户选择充电方式分析

设 Z 市某一整车充电方式的随机线路运行电动汽车在运行中发生低电报警,需要充电,根据国内已建成运营的充电站充电参数,设不同充电方式实际充电电量 q_i 及其他参数如表1所示。

表1 充电方式选择
Table 1 Choose the charging method

充电方式	$q_i /$ (kW·h)	$e_i /$ kW	$b_i /$ 元	$t_i /$ 次	$x_i /$ (元· (kW·h) ⁻¹)
停车场 充电桩慢充	30	5	40 000	800	0.6
充电站快充	30	30	40 000	100	1.0
充电站慢充	30	10	40 000	600	0.8

充电方式	$c /$ 元	$\mu /$ (元·h ⁻¹)	$n_i /$ 元	$m_i /$ (元· (kW·h) ⁻¹)	$z_i /$ 元
停车场 充电桩慢充	2	15	160.00	5.33	29.21
充电站快充	2	15	447.00	14.90	81.61
充电站慢充	2	15	137.67	4.59	25.13

假设此电动汽车最大充电电量需求为60 kW·h,而此时只须充电30 kW·h便可满足当日行驶要求,此时出行时间价值为15元/h,由表1可以得出,此时充电站慢充的综合充电成本最小,故应选择充电站慢充。模型中考虑了充电电池的折旧损耗费用,由表1可得,不同充电方式此部分所占的费用差别较大,快充远大于另外2种方式。但若此时为紧急情况,出行时间价值大大增加,假设出行时间价值为200元/h,则表1中3种充电方式的综合

成本分别为 231.87 元、115.39 元、126.46 元,显然此时应选择充电站快充。

4.2 充电设施规划分析

以城市 Z 为例进行电动汽车充电设施规划。示范阶段和公益阶段规划在此不做过多叙述,假设规划年电动汽车处于商业运营阶段,电动汽车保有量为 10 万辆,电动汽车充电需求饱满,其他参数如表 2 所示。根据式(1)~式(6)进行充电方式选择、充电需求预测(重点关注充电站的容量需求,换电站的电量需求);再根据式(7)~式(11)确定充电设施的建设容量(充电站)和电量储备(换电站),如表 2 所示。

表 2 充电需求预测和充电设施规划
Table 2 Charging demand forecast and planning of charging infrastructure

充电方式	$L_i'/$ 万辆	$L_i/$ 万辆	$e_i/$ kW	$P_i/$ MW	R_1	$P_i'/$ MW
更换电池	6.0	3.0				
充电站快充	8.0	1.0	30	300	1.5	450.0
充电站慢充	9.0	2.5	10	250	1.3	325.0
停车场 充电桩慢充	9.5	3.5	5	175	1.1	192.5

充电方式	$a_i/$ 次	$q_i/$ (kW·h)	$Q_i/$ (MW·h)	R_2	$Q_i'/$ (MW·h)
更换电池	3	40	3 600	1.3	4 680

由表 2 可得规划年各种充电方式充电站总建设容量、换电站总电量储备。根据 Z 市实际路网情况进行分区及充电设施选址、定容,其中选址分布由式(12)进行约束,各充电设施具体的配置在此不再赘述。

5 结语

本文分析了电动汽车充电设施规划的特征,将电动汽车充电设施规划分为示范、公益和商业运营 3 个阶段;根据电动汽车充电方式多样化的特点,提出了充电方式选择优化的模型,并对各种充电方式的充电需求进行预测;提出了间距比、充电容量冗余度、充电电量冗余度等概念;提出了充电设施的规划原则、流程以及规划模型;最后对某地充电设施规划的案例分析证明了模型的适用性。

电动汽车充电设施的普及势必会影响城市负荷的变化,考虑充电设施大量投入运营后对电网的影响,将是未来一个重要的研究方向。

参考文献

[1] 国家发展和改革委员会. 产业结构调整指导目录(2007 年)[EB/OL]. [2007-12-26]. http://zys.ndrc.gov.cn/xwfb/t20071226_181200.htm.

[2] 首届中国绿色能源汽车发展高峰论坛举行[EB/OL]. [2008-09-03]. http://www.moc.gov.cn/zhuzhan/jiaotongxinwen/xinwenredian/200809xinwen/200809/t20080903_519133.html.

[3] THOMAS C E S. Transportation options in a carbon-constrained world: hybrids, plug-in hybrids, biofuels, fuel cell electric vehicles, and battery electric vehicles. International Journal of Hydrogen Energy, 2009(34): 9279-9296.

[4] 桂长清. 燃料电池电动汽车前景分析. 电池工业, 2009, 14(1): 44-47.
GUI Changqing. Prospect analysis of electric vehicle powered by fuel cells. Chinese Battery Industry, 2009, 14(1): 44-47.

[5] 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. 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. Power System Technology, 2009, 33(4): 1-5.

[6] 刘保杰, 王艳, 殷天明. 电动汽车电池管理系统. 电气自动化, 2010, 32(1): 60-63.
LIU Baojie, WANG Yan, YIN Tianming. EV battery management system. Electrical Automation, 2010, 32(1): 60-63.

[7] 康继光, 卫振林, 程丹明, 等. 电动汽车充电模式与充电站建设研究. 电力需求侧管理, 2009, 11(5): 64-66.
KANG Jiguang, WEI Zhenlin, CHENG Danming, et al. Research on electric vehicle charging mode and charging stations construction. Power Demand Side Management, 2009, 11(5): 64-66.

[8] 徐凡, 俞国勤, 顾临峰, 等. 电动汽车充电站布局规划浅析. 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. East China Electric Power, 2009, 37(10): 1678-1682.

[9] NANSAI K, TOHNOB S, KONOC M, et al. Life-cycle analysis of charging infrastructure for electric vehicles. Applied Energy, 2010, 70(3): 251-265.

[10] 王成山, 魏海洋, 肖峻, 等. 变电站选址定容两阶段优化规划方法. 电力系统自动化, 2005, 29(4): 62-66.
WANG Chengshan, WEI Haiyang, XIAO Jun, et al. Two-phase optimization planning approach to substation location and sizing. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(4): 62-66.

[11] 葛少云, 李慧, 刘洪. 基于加权 Voronoi 图的变电站优化规划. 电力系统自动化, 2007, 31(3): 29-33.
GE Shaoyun, LI Hui, LIU Hong. Substation optimization planning based on the weighted Voronoi diagram. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(3): 29-33.

[12] 林济铿, 李鸿路, 罗萍萍, 等. 统一考虑变电站和网架优化的配电网综合规划. 电力系统自动化, 2006, 30(19): 42-46.
LIN Jikeng, LI Honglu, LUO Pingping, et al. Integrated planning for the distribution system with the unified optimization of substation and network frame. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(19): 42-46.

(下转第 45 页 continued on page 45)

- [13] HADLEY S W. Evaluating the impact of plug-in hybrid electric vehicles on regional electricity supplies// Proceedings of 2007 IREP Symposium; Bulk Power System Dynamics and Control-VII; Revitalizing Operational Reliability, August 19-24, 2007, Charleston, SC, USA.
- [14] 姚建国, 赖业宁. 智能电网的本质动因和技术需求. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 1-4.
YAO Jianguo, LAI Yening. The essential cause and technical requirements of the smart grid. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 1-4.
- [15] 李威, 丁杰, 姚建国. 智能电网发展形态探讨. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 24-28.
LI Wei, DING Jie, YAO Jianguo. Views on smart grid evolution. Automation of Electric Power Systems, 2010,

34(2): 24-28.

- [16] 今年 27 城市开建电动车充电站 [EB/OL]. [2010-01-19].
<http://www.sgcc.com.cn/xwzx/mtbd/215636.shtml>.
- [17] 雒志才. 公路运输经济学. 北京: 人民交通出版社, 1998.

吴春阳(1986—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 电力系统规划、电力系统信息化. E-mail: wcy_elec416568@sina.com

黎灿兵(1979—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 主要研究方向: 电力系统信息化、规划与新能源. E-mail: licanbing@vip.163.com

杜力(1986—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 电网规划、电力负荷预测. E-mail: goodduli2004@163.com

A Method for Electric Vehicle Charging Infrastructure Planning

WU Chunyang¹, LI Canbing², DU Li¹, CAO Yijia²

(1. Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Electric vehicle has received more and more extensive attention, which is one of the major development directions of motor vehicles using new energy sources. The construction of charging infrastructure is an important prerequisite for the advancement of electric vehicles. Different from substation planning and gas station planning, the planning of electric vehicle charging infrastructure has its own distinct characteristics. The development stages of electric vehicle charging infrastructure is proposed, which can be divided into 3 stages, the demonstration stage, public promotional stage and commercial utilization stage. And the characteristics of each stage are studied. The optimization model of charge mode choices is also proposed, and the charging demand of each changing methods can be forecasted based on this model. The principle, process and model of planning for charging infrastructure are proposed, together with the interval-distance ratio, charge capacity redundancy and charging power redundancy. Case studies are given to show that the proposed planning method is adaptive.

Key words: electric vehicle; charging infrastructure; charging mode; charging demand; planning