

基于排队论的电动汽车充电设施优化配置

李如琦, 苏浩益

(广西大学电气工程学院, 广西壮族自治区南宁市 530004)

摘要: 在分析电动汽车充电行为的基础上, 基于排队论建立了充电设施服务系统排队模型。在此基础上, 研究了充电设施服务系统在排队等候中的概率特征, 并定量分析了充电设施的运行效率。以充电设施服务系统总费用最小为目标函数建立了充电设施费用最优模型。结合电动汽车充电功率需求预测结果, 研究了电动汽车充电设施不同配置方式对电网负荷率的影响。研究结果表明, 通过合理配置充电设施, 可以提高充电设备综合利用效率, 从而进一步验证了所提模型的实用性和有效性。

关键词: 电动汽车; 排队论; 随机动态过程; 负荷率; 充电设施; 优化配置

0 引言

兼具低污染、零排放特性的电动汽车具有良好的发展前景, 而完善的电动汽车充电体系的建立是其发展的前提和基础。随着充电设施的大规模建设, 如何科学合理配置电动汽车充电设施, 成为当前急需解决的问题之一。

目前, 电动汽车充电设施的研究已取得了初步研究成果^[1-7]。本文则结合电力负荷的特点, 以提高电动汽车充电设备综合利用率为出发点, 对电动汽车充电设施优化配置问题进行了研究。

1 电动汽车充电行为分析

电动汽车的充电行为具有较大的随机性和灵活性^[8-9]。经调查分析发现, 由于车况的多样性和电动汽车运行条件等不确定因素的影响, 到达充电站的电动汽车数量随时间变化的规律一般服从参数为 λ 的泊松分布^[10-11]。同时, 某一电动汽车到达充电站时, 如果充电设施有空闲, 则可以接受充电服务, 当服务结束以后就离开充电站; 如果充电设施没有空闲, 则电动汽车需要排队等候服务, 直到充电站有空闲的充电设施时再按照一定的次序接受充电服务。因此, 从排队系统服务规则的角度来说, 它属于先到先服务。电动汽车接受充电服务的时间服从参数为 μ 的负指数分布。一般来说, 一个电动汽车充电站均配有 2 个以上的充电设施。

2 电动汽车充电设施的排队模型建立

2.1 排队论的基本原理

排队论通过对服务对象到达时间和服务时间的

统计分析, 得出等待时间、排队长度、服务强度等统计指标量, 据此改进服务系统的结构, 使得服务系统既可以满足服务对象的需求, 又能够使服务系统的某些指标最优。

2.2 充电设施服务系统指标的求解

根据第 1 节电动汽车充电行为的分析结果和排队论的基本原理, 可以得到电动汽车充电设施服务系统的平衡方程^[10]为:

$$\begin{cases} \lambda p_0 = \mu p_1 \\ \lambda p_{n-1} + (n+1)\mu p_{n+1} = (\lambda + n\mu) p_n & n \leq s \\ \lambda p_{n-1} + s\mu p_{n+1} = (\lambda + s\mu) p_n & n > s \end{cases} \quad (1)$$

式中: p_n 为有 n 辆电动汽车接受充电服务的概率; s 为可提供充电服务的充电设施数量; n 为接受充电服务的电动汽车数量; $0 \leq n \leq s$ 时, 表示系统内有 n 辆电动汽车正在接受充电服务, 其余 $s-n$ 个可充电设施处于空闲状态; 当 $n > s$ 时, 表示系统内 s 个可充电设施全部在进行充电服务, 其余 $n-s$ 辆电动汽车排队等候充电。

利用递推法求解式(1)所示的差分方程, 可得电动汽车接受充电服务的概率为:

$$\begin{cases} p_0 = \left[\sum_{k=0}^{s-1} \frac{1}{k!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k + \frac{1}{s!} \frac{\mu}{\mu - \lambda} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^s \right]^{-1} \\ p_n = \begin{cases} \frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n p_0 & n \leq s \\ \frac{1}{s!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n p_0 & n > s \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

由此可得到充电设施服务系统的运行指标^[10]如下。充电设施服务强度 ρ 为:

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} \quad (3)$$

充电设施利用率 β 为:

收稿日期: 2011-02-28; 修回日期: 2011-05-18。

$$\beta = \frac{\lambda}{s\mu} \quad (4)$$

充电系统平均排队长度 L_q 为:

$$L_q = \frac{\rho^s \beta p_0}{s!(1-\beta)^2} \quad (5)$$

充电系统平均队长 L_s 为:

$$L_s = \frac{\rho^s \beta p_0}{s!(1-\beta)^2} + \frac{\lambda}{\mu} \quad (6)$$

电动汽车的排队时间 T_q 为:

$$T_q = \frac{L_q}{\lambda} \quad (7)$$

电动汽车的逗留时间 T_s 为:

$$T_s = \frac{L_s}{\lambda} \quad (8)$$

再来车辆必须等待的概率 p_{wait} 为:

$$p_{\text{wait}} = \frac{\rho^{s+1} p_0}{s!(1-\beta)} \quad (9)$$

电动汽车充电设施规划还受充电容量冗余度 R_1 和充电电量冗余度 R_2 的约束^[8]:

$$R_1 = \frac{\eta Q}{se} \geq \xi \quad (10)$$

$$R_2 = \frac{\eta QT}{sqm} \geq \zeta \quad (11)$$

式中: η 为充电设施的总体负载率; Q 为充电设施的容量; e 为平均充电功率; ξ 为充电容量冗余度最小值; T 为综合负载时间; m 为充电口每天平均充电次数; q 为实际充电电量; ζ 为充电电量冗余度最小值。

对于接受充电服务的顾客而言, 充电系统平均队长越长, 顾客等待的时间就越长, 再来车辆必须等待的概率越大, 顾客前来接受服务的概率就越小。本文定义综合满意度 M_z 为:

$$M_z = \frac{1}{L_s p_{\text{wait}}} \quad (12)$$

综合满意度越大, 表明顾客对该服务系统的认可度越大, 反之则越小。

3 充电设施最优费用模型的建立和求解

从规划的角度出发, 以单位时间内单个充电设施的平均费用系数作为充电服务系统运行费用的衡量指标, 可以较好地从宏观的角度描述充电服务系统的经济性, 使得电动汽车充电设施的费用在一段较长时间内达到最优。

充电设施服务系统在单位时间内的总费用 C , 可以概括为充电设施的服务成本和电动汽车排队行为引发的等待费用 2 个部分^[10]。其最优费用模型为:

$$\min C = c_1 s + c_2 L_s \quad (13)$$

$$c_1 = \frac{\sum_{d=1}^{365} (\sum_{t=1}^u c_{1,d,f} + \sum_{t=1}^v c_{1,d,p} + \sum_{t=1}^w c_{1,d,g})}{8760} \quad (14)$$

$$c_{1,d,f}(t) = \rho_{d,f}(t) + \rho_b \quad (15)$$

$$c_{1,d,p}(t) = \rho_{d,p}(t) + \rho_b \quad (16)$$

$$c_{1,d,g}(t) = \rho_{d,g}(t) + \rho_b \quad (17)$$

式中: c_1 为单位时间内单个充电设施的费用系数平均值, 以某一年峰谷分时电价的历史统计数据为基础分析得出; c_2 为单位时间内单台电动汽车的相关费用, 包括因等待充电而产生的误工费等; $c_{1,d,f}(t)$, $c_{1,d,p}(t)$, $c_{1,d,g}(t)$ 分别为单个充电设施在第 d 日的峰时段、平时段、谷时段的某一等分时段 t 对应的相关费用系数, 由电费、设备折旧费和维护成本等构成; u, v, w 分别为峰时段数、平时段数、谷时段数; $\rho_{d,f}(t)$, $\rho_{d,p}(t)$, $\rho_{d,g}(t)$ 分别为第 d 日峰时段、平时段、谷时段的某一等分时段 t 对应的电价, 其确定详见文献^[12]; ρ_b 为单位时间内单个充电设施的设备折旧费和维护成本等构成的综合费用值, 是一个固定值。

假设 s 为充电设施可充电设施数量的最优值, 则有:

$$\begin{cases} C_{s-1} \geq C_s \\ C_s \leq C_{s+1} \end{cases} \quad (18)$$

式中: C_s 为可充电设施数目为 s 时的费用, 其他参数的物理意义类似。

代入相关参数, 由式(18)可推导出:

$$L_s - L_{s+1} \leq \frac{c_1}{c_2} \leq L_{s-1} - L_s \quad (19)$$

结合 s 的实际意义, 它应该是一个整数解, 通过对式(19)输入不同的 s 值, 即可求得最优解。

4 充电设施的配置及其影响

影响电动汽车电力需求的因素主要包括动力电池、充电设施、用户行为等 3 个方面^[9]。动力电池的容量决定电动汽车的充电频率, 充电设施的数目及其分布影响充电需求的时间分布, 用户行为对电动汽车功率需求起主导作用, 具有随机性^[13]。充电设施服务系统排队模型中的充电系统平均队长、再来车辆必须等待的概率等指标较好地刻画或者是影响了用户的充电行为。如果充电设施配置合理, 一方面可以保证服务系统的综合满意度在用户可以接受的范围以内, 另一方面可以提高充电设施的利用效率, 使系统达到最优。

电动汽车的规模化应用可以提高电网的负荷率^[14]。利用夜晚负荷低谷时段对电动汽车充电, 能

够有效地提高低谷负荷;在白天高峰负荷出现之前对电动汽车充电,可以增加电网日平均用电量。因此,以电动汽车充电服务系统排队模型中的充电系统平均队长、再来车辆必须等待的概率等运行指标为依据,对充电设施进行合理配置,引导用户在合适的时段进行充电,结合峰谷分时电价体系的作用,能够有效地减小电网峰谷差,提高电网的负荷率^[15]。

5 算例分析

假设某电动汽车充电站同种类型的可充电设施数量共有 24 个,每分钟内到达充电站的电动汽车数量服从参数为 $\lambda=3.2$ 的泊松分布,每辆电动汽车接受充电服务的时间服从参数为 $\mu=0.14$ 的负指数分布。为便于分析,假设计算过程中充电容量冗余度和充电电量冗余度均满足约束。求得该模型的运行指标如表 1 所示。

表 1 服务系统运行指标
Tab. 1 Operation indexes of service system

运行指标	$p_0/\%$	$L_q/\text{辆}$	$L_s/\text{辆}$
计算值	5.5×10^{-9}	13.123 2	35.982 4
运行指标	T_s/min	T_q/min	p_{wait}
计算值	11.242 3	4.100 2	0.740 5

通过表 1 中数据结合式(4)得出充电设施利用率高达 0.952 4,该充电站的空闲率较小。充电设施服务系统中的平均电动汽车数目为 35 辆,充电高峰期容易出现拥堵。电动汽车在队列中平均等待时间为 4.100 2 min,电动汽车到达充电设施后必须等待的概率为 0.740 5,结合式(12)得出顾客的综合满意度为 0.037 5,顾客对该系统的认可度较低。

假设 $c_1/c_2=2.79$,将不同的 s 值代入到式(19)中。经计算可得当 $s=30$ 时满足式(19)表示的条件,所以,该电动汽车充电设施服务系统的最佳可充电设备数目为 30。

某市有 1.5 万辆,20 万辆,50 万辆同类型的电动汽车以后,分别转移负荷 15 MW,200 MW,500 MW,电网负荷率的变化情况^[14]见表 2。

表 2 电动汽车低谷充电后电网的负荷率
Tab. 2 Load factors of power grid after electric vehicles charging in the valley period

转移负荷/MW	负荷率/%	相对原负荷率的变化情况/%
15	84.7	0.1
200	85.8	1.2
500	87.6	3.0

上述结论是在电动汽车的充电时间集中在夜间低谷时段(01:00—05:00)得到的。要使电动汽车车主最大限度地参与到负荷低谷时段集中充电中来,

除了电价等激励措施以外,充电服务系统的运行情况也会影响车主的行为。

假设该市建有同等规模的电动汽车充电站数个,为便于分析,假设各充电站服务系统排队模型参数一致。该市拥有 1.5 万辆,20 万辆,50 万辆同类型的电动汽车时,各充电站对应的参数 λ 分别为 3.2, 42.7, 106.7, 而 μ 均为 0.14。现从服务系统运行特征的角度进行分析,假设当充电服务系统的综合满意度大于 0.2 时,所有的电动汽车将集中在夜间低谷时段(01:00—05:00)充电,得出此时各充电站对应的最小可充电设施数量如表 3 所示。

表 3 不同数量的电动汽车对应的最小充电设施数量
Tab. 3 Minimum number of charging facilities under different electric vehicles' scales

电动汽车数量/万辆	1.5	20	50
最小充电设施数量/个	32	248	580

从表 3 可知,随着电动汽车数量的增加,为了吸引车主在负荷低谷时段集中充电必须适当增加充电设施。也就是说,通过配置适当的充电设施可以有效地提高电网的负荷率。

6 结语

本文通过对电动汽车充电行为随机动态特征进行分析,建立了电动汽车充电服务系统排队数学模型。经分析指出,通过合理配置充电设施可以实现不同规模条件下的电动汽车在负荷低谷时段集中充电,提高电网负荷率。通过数值分析验证了该模型的有效性,该模型对电动汽车充电设施的运行和规划具有重要参考价值。电动汽车充电设施的规模化应用对电网的影响是极其复杂的,如何实现充电设施自身的安全高效运行,以及充电设施并入电网后如何保证系统的经济性和稳定性,还要开展大量的研究工作。

参考文献

- [1] 杨永标,丁孝华,朱金大,等. 物联网应用于电动汽车充电设施的设想[J]. 电力系统自动化,2010,34(21):95-98.
YANG Yongbiao, DING Xiaohua, ZHU Jinda, et al. Assumption of Internet of things applied in electric vehicle charging facilities[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(21): 95-98.
- [2] 赵俊华,文福拴,薛禹胜,等. 计及电动汽车和风电出力不确定性的随机经济调度[J]. 电力系统自动化,2010,34(20):22-29.
ZHAO Junhua, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. Power system stochastic economic dispatch considering uncertain outputs from plug in electric vehicles and wind generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(20): 22-29.

- [3] 黄梅,黄少芳. 电动汽车充电站谐波的工程计算方法[J]. 电网技术, 2008, 32(20): 20-23.
HUANG Mei, HUANG Shaofang. A harmonic engineering calculation method for electric vehicle charging station [J]. Power System Technology, 2008, 32(20): 20-23.
- [4] 周逢权,连湛伟,王晓雷,等. 电动汽车充电站运营模式探析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 63-66.
ZHOU Fengquan, LIAN Zhanwei, WANG Xiaolei, et al. Discussion on operation mode to the electric vehicle charging station[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 63-66.
- [5] 李瑞生,王晓雷,周逢权,等. 灵巧潮流控制的电动汽车智能化充电站[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 87-90.
LI Ruisheng, WANG Xiaolei, ZHOU Fengquan, et al. The system of electric vehicle intelligence charge station with smart power flow control[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 87-90.
- [6] 丁志刚,汪世平,周华良,等. 一种适用于电动汽车充电机的变压器钳位 DC/DC 变换器[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(24): 78-82.
DING Zhigang, WANG Shiping, ZHOU Hualiang, et al. A transformer clamping DC/DC convertor suitable for electric vehicle charger [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(24): 78-82.
- [7] 腾乐天,何维国,杜成刚,等. 电动汽车能源供给模式及其对电网运营的影响[J]. 华东电力, 2009, 37(10): 1675-1677.
TENG Letian, HE Weiguo, DU Chenggang, et al. Power supply modes for electrical vehicles and their impacts on grid operation[J]. East China Electric Power, 2009, 37(10): 1675-1677.
- [8] 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 vehicle charging infrastructure planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(24): 36-39.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 梅振宇,陈峻,王炜. 城市路内停车设置规模非线性优化模型及其算法[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(2): 89-93.
MEI Zhenyu, CHEN Jun, WANG Wei. Nonlinear optimization model and algorithm of urban curb parking setting scale[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(2): 89-93.
- [12] 唐捷,胡秀珍,任震,等. 峰谷分时电价定价模型研究[J]. 电力需求侧管理, 2007, 9(3): 12-15.
TANG Jie, HU Xiuzhen, REN Zhen, et al. Research of peak-valley TOU pricing model [J]. Power Demand Side Management, 2007, 9(3): 12-15.
- [13] BRADLEY T, QUINN C. Analysis of plug-in hybrid electric vehicle utility factors [J]. Journal of Power Sources, 2010, 195(16): 5399-5408.
- [14] 魏春,韩民晓,杨霞. 低碳经济对电网负荷率特性的影响分析[J]. 电网技术, 2010, 34(9): 100-104.
WEI Chun, HAN Minxiao, YANG Xia. Analysis on influences of low-carbon economy on load factor of power grid [J]. Power System Technology, 2010, 34(9): 100-104.
- [15] 胡福年,汤玉东,邹云. 需求侧实行峰谷分时电价策略的影响分析[J]. 电工技术学报, 2007, 22(4): 168-174.
HU Funian, TANG Yudong, ZOU Yun. Analysis of impacts of TOU price strategy [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(4): 168-174.

李如琦(1959—),女,教授,硕士生导师,主要研究方向:电力系统最优运行与规划、电力系统计算与分析。

苏浩益(1985—),男,通信作者,硕士研究生,主要研究方向:电力系统最优运行与规划、智能电网。E-mail: suhaoyi8888@126.com

Optimal Allocation of Charging Facilities for Electric Vehicles Based on Queuing Theory

LI Ruqi, SU Haoyi

(Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: By analyzing the characteristics of electric vehicles' charging behavior, a queuing model for charging facilities' service system for electric vehicles based on queuing theory is established. On this basis, the waiting probability characteristics of charging facilities' service system for electric vehicles are studied, and the operation efficiency of charging facilities for electric vehicles is analyzed quantitatively. Furthermore, an optimal cost model for electric vehicle charging facilities is developed with the minimum of the total cost of service system as the objective function. By referring to the forecast results of electric vehicles' power demand, the influence of different charging facilities' allocation schemes on load factors of power grid is analyzed. The analysis results show that the synthetic efficiency for charging facilities utilization can be improved by reasonable allocating charging facilities, and the practicality and effectiveness of the model are further verified.

Key words: electric vehicle; queuing theory; stochastic dynamic processes; load factor; charging facilities; optimal allocation