

基于排队理论的储能式快充站容量优化配置

方超明¹, 张宇^{1,2}, 王育飞¹, 刘耀辉¹

(1. 上海电力学院, 上海 200090; 2. 国网上海市电力公司, 上海 200122)

Optimized Capacity Allocation of Fast Charging Station with Energy Storage Based on Queuing Theory

FANG Chaoming¹, ZHANG Yu^{1,2}, WANG Yufei¹, LIU Yaohui¹

(1. Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200122, China)

摘要: 电动汽车快速充电能有效解决充电时间长的缺点, 但充电功率大且具有较大的随机性。为了解决这一问题, 将储能应用于快速充电站, 可缓解电网压力, 提高电网稳定性。根据传统加油站车辆进站分布, 运用排队理论对充电站进行负荷建模, 以满足日最大到达率确定充电机数量。将充电机量化为储能侧充电机和电网侧充电机, 构建了一种充电容量配置模型。该模型以充电站设备投资成本和购电成本最小为目标, 配置充电机比例。最后通过算例验证了该模型的可行性和有效性。

关键词: 快速充电; 储能; 容量配置; 排队理论

Abstract: Fast charging of electric vehicles can effectively solve the disadvantage of long-time charging, but it has such features as high charging power and great randomness. To solve this problem, energy storage is applied to fast charging stations for electric vehicle to alleviate the pressure of the power grid, and to enhance the stability of power grid. According to distribution of vehicle stops for traditional gas station, the Queuing Theory is used to build load model of charging station to obtain the day's biggest arrival rate, then to determine the number of chargers. The chargers are divided into storage side chargers and grid side chargers, and a charging capacity allocation model is constructed. The objective of this model is to minimize investment costs of station equipment and purchase costs of electricity, so the proportion of chargers is configured. In the end, the feasibility and validity of the model are verified through an example.

Keywords: fast charging; energy storage; capacity allocation; queuing theory

0 引言

随着全球对能源和环境问题的持续关注, 节能减排成为当今世界的主题, 电动汽车作为一种清洁高效的交通工具在近年来得到了迅速发展^[1-2]。为电动汽车供能的充电基础设施是制约电动汽车发展的关键因素。近年来, 已有大量的电动汽车基础充电设施研究, 并取得初步的研究成果^[3-5]。快速充电能在短时间内完成电动汽车能源补给, 弥补了电动汽车充电时间长的缺点。但电动汽车快速充电功率大, 大规模充电站的接入将影响配电网的安全稳定运行, 将给配电网带来较大的冲击^[6-7]。随着电池快充性能的不不断提高, 快充模式对电网的影响和冲击还有不断加剧的趋势。为了满足快速充电站的脉冲充电功率需求, 将储能系统应用于充电站对电网安全运行具有重要意义。

目前, 将储能系统应用于充电站缓解电动汽车充电给电网带来的脉冲功率的研究较少。为了缓冲电动汽车充电的脉冲功率, 文献 [6] 提出了充电站中储能缓冲系统的运行方式和控制策略, 搭建含储能缓冲系统的快速充电站模型, 分析不同电动汽车脉冲充电功率下储能缓冲系统动态特性, 验证了所提出控制策略的正确性和有效性。文献 [8-10] 将充电站和储能站结合, 构成充放储一体化站, 配合电网调度实现电网与电站之间的灵活能量互动, 侧重于储能站而非单个充电站。对于储能式快充站的拓扑和储能系统的容量确定, 文献 [11] 将储能系统运用于快速充电站, 主要对快速充电站拓扑结构进行设计, 通过蒙特卡洛方法求解储能容量大

基金项目: 国际科技合作与交流专项(2014DFA80490)

小。文献 [12] 将储能应用于电动公交车快速充电站，根据历史运行数据，分析储能系统的价值，仿真结果表明储能系统能够减小总成本 22.85%。建设储能式快速充电站考虑电网安全稳定的同时还要结合经济性对储能系统的大小进行合理的配置。

本文通过参考传统加油站车辆进站分布确定每个时刻的到达率。通过排队理论分析快速充电站所能满足的日最大到达率所对应的充电桩数量，同时确立快速充电站日充电负荷曲线，根据充电负荷曲线在充电站中配置储能。由于储能系统成本高，配置过多容易造成财力浪费。因此合理地配置储能系统大小对快速充电站的产业发展和电网安全稳定运行意义重大，本文将围绕此问题展开。

1 电动汽车充电站排队模型建立

电动汽车进站充电具有较大的随机性。调查统计发现，电动汽车到站充电的数量随时间变化的规律服从参数为 λ 的泊松分布^[3-4,13]。某电动汽车到达充电站，若有空闲充电设施，则可接受充电服务，接受服务后自行离开充电站；若没有空闲充电设施，则电动汽车需排队等候，直到有空闲充电设施后完成充电服务。对于排队系统采用先到先服务模式，用等待时间、排队长度、服务强度等指标来描述系统服务质量^[3]。

进站充电模型与 Erlang-C 模型^[14]类似，电动汽车进站服从参数为 λ 的泊松分布，由于车辆进站时初始荷电状态不同，假设其服务时间服从参数为 μ 的负指数分布^[13]。设充电站有 k 个充电桩，则该充电站属于标准的 $M/M/k/\infty$ 排队系统模型，当充电站系统电动汽车数量为 n 时，系统平均服务率为 $\mu(n) = \min(n, k)\mu$ 。系统符合生死过程，其状态转移如图 1 所示。

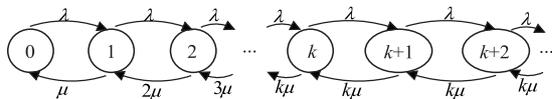


图 1 排队系统状态转移图

系统服务强度 $A = \lambda/\mu$ ，稳定条件 $\lambda < k\mu$ 即 $A < k$ ，则 $M/M/k/\infty$ 排队系统稳态平衡方程^[14]：

$$\begin{cases} \pi_n = \frac{A^n \pi_0}{n!}, & n = 0, 1, 2, \dots, k-1 \\ \pi_n = \frac{A^n \pi_0}{k! k^{n-k}}, & n = k, k+1, k+2, \dots \end{cases} \quad (1)$$

式中： π_n 为 n 辆电动汽车接受服务的稳态概率，且 $\sum_{n=0}^{\infty} \pi_n = 1$ 。

$$\pi_0 = \left(\sum_{n=0}^{k-1} \frac{A^n}{n!} + \frac{A^k}{k!} \frac{k}{k-A} \right)^{-1} \quad (2)$$

根据 Erlang-C 公式，则可得到需要等待的概率 $P_C(k, A)$ ：

$$P_C(k, A) = \frac{\sum_{n=k}^{\infty} \pi_n}{\sum_{n=0}^{\infty} \pi_n} = \frac{\frac{A^k}{k!} \frac{k}{k-A} \pi_0}{\sum_{n=0}^{k-1} \frac{A^n}{n!} + \frac{A^k}{k!} \frac{k}{k-A}} \quad (3)$$

假设系统队列长度、排队长度、服务时间、排队等待时间、停留时间分别用 L 、 L_Q 、 S 、 W_Q 和 D 表示，由此可以得到充电站服务指标如下。

充电站的平均队长为

$$E(L) = P_C(k, A) \frac{A}{k-A} + A \quad (4)$$

充电站的平均排队长度为

$$E(L_Q) = \sum_{n=k}^{\infty} (n-k) \pi_n = P_C(k, A) \frac{A}{k-A} \quad (5)$$

充电站的平均服务时间为

$$E(S) = 1/\mu \quad (6)$$

顾客在充电站中的平均排队等待时间为

$$E(W_Q) = \frac{P_C(k, A) \frac{A}{k-A}}{\lambda} = \frac{P_C(k, A)}{\mu k - \lambda} \quad (7)$$

顾客在充电站中的平均停留时间为

$$E(D) = E(W_Q) + E(S) = \frac{P_C(k, A)}{\mu k - \lambda} + \frac{1}{\mu} \quad (8)$$

因为 Erlang 公式单调^[14]，当限定阻塞率或限定平均等待时间时，即可得到对应 k 个充电桩所能支持的最大到达率。

2 充电机的优化配置

储能式快速充电站给电动汽车充电分为电网充电模式和储能系统补充模式，本文研究的储能式快速充电站拓扑结构如图 2 所示。通过控制储能系统，优先电网充电，当电网充电功率达到峰值时，储能系统放电满足充电需求，结合充电站充电负荷曲线配置储能系统大小，将充电比例量化为充电机所占比例。

储能式快速充电站充电机配置根据规划满足一

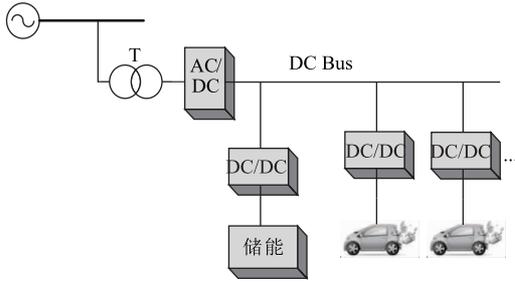


图2 储能式快速充电桩拓扑结构

定条件下最大到达率所对应的充电桩数量 N ，然后量化配置电网充电桩和储能充电桩对应的数量。假设电网充电桩 x 个，则储能系统充电桩为 $(N-x)$ 。考虑到储能系统的成本、寿命和充电功率具有随机性，假设储能系统采用一天一次充电多次放电，满足充电高峰时段。兼顾储能系统的成本和收益，以充电站设备投资成本和向电网购电的成本最小为目标：

$$\min f = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 \quad (9)$$

2.1 充电成本

充电站的充电成本包括电网直接向电动汽车充电的成本和电网向储能系统充电的成本，分别用 C_1 和 C_2 表示。

电网直接给电动汽车充电所提供的最大充电功率为 $P_0 = P_{CN}x$ ， P_{CN} 为充电机额定充电功率， P_C 为充电站充电负荷。则直接充电成本 C_1 为

$$C_1 = \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^{1440} p_t P'_C \Delta t \quad (10)$$

$$P'_C = \begin{cases} P_C, P_C \leq P_0 \\ P_0, P_C > P_0 \end{cases} \quad (11)$$

式中： p_t 为分时电价； P'_C 为电网充电机充电功率。

假设在低谷电价时段完成储能系统充电，则电网向储能系统充电的成本 C_2 为

$$C_2 = \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^{1440} (P_C - P_0) \Delta t p_{low} \quad (P_C > P_0) \quad (12)$$

$$= \sum_{d=1}^D \sum_{t=t_1}^{t_2} P_{CB} \Delta t' p_{low}$$

$$P_{CB} + P'_C \leq P_T \quad (13)$$

式中： p_{low} 为低谷电价； P_{CB} 为电网给储能系统的充电功率； t' 为电网给储能系统充电时间， $t_1 \sim t_2$ 属于低谷时段； P_T ($P_T = P_0 + 10\%$) 为变压器的额定功率，考虑 10% 的裕量。

2.2 投资成本

本文充电站投资成本只考虑母线变压器、馈线成本 C_3 和储能投资成本 C_4 ，将其转换为等年值成本。

$$C_3 = \frac{\alpha(1+\alpha)^Y}{(1+\alpha)^Y - 1} (c_T P_T + c_L P_L) \quad (14)$$

$$C_4 = \frac{\alpha(1+\alpha)^Y}{(1+\alpha)^Y - 1} c_B \omega_B \quad (15)$$

$$\omega_B = \sum_{t=1}^{1440} (P_C - P_0) \Delta t / 0.7 \quad (16)$$

式中： α 为贴现率， Y 为设备使用年限； P_T 、 P_L 、 ω_B 和 c_T 、 c_L 、 c_B 分别为变压器、馈线和储能的容量和单位成本，储能系统容量考虑了放电下限和负荷曲线采用平均值的备用容量。

由(10)~(16)可知，目标函数只有一个离散变量 x ，随着变量 x 的递增， C_1 、 C_3 增加， C_2 、 C_4 减小，即可求出最小成本所对应的 x 。

3 算例分析

假设某快速充电站 1 天有 400 辆电动汽车来此充电，根据传统加油站汽车进站分布可得出每小时汽车进站充电数量。参考挪威国家石油公司的统计数据^[15]，传统加油站车辆进站分布如图 3 所示。假设电动汽车进站服从泊松分布，则可得出快速充电站 1 天内每小时进站参数 λ_k ($k=1, 2, \dots, 24$)。电动汽车电池容量约为 20~30kWh，典型电动汽车直流快速充电功率预计在 2020 年能够达到 100~120kW^[16]。以 120kW 的充电功率给 30kWh 的电动汽车充电，其充电时间为 15min，则在一定程度上符合用户的行为习惯。假设每辆电动汽车接受充电服务时间服从 $\mu=4$ 的负指数分布，取平均最大等待时间 2min。

运用排队理论，限定平均最大等待时间 (2 min)，充电桩所对应的最大到达率如图 4 所示，充电桩数量从 1 变到 20，每个充电桩对应所支持的最大到达率。根据传统加油站车辆日进站分布可得日最大到达率为 48.52 辆/h，充电站需要配置 13 个充电桩才能满足日最大充电需求。

根据传统加油站日进站分布的统计数据，可知快充站每小时进站参数 λ_k ($k=1, 2, \dots, 24$)，假设每个充电桩额定充电功率为 120kW，则可得出储能式快充站日充电负荷曲线如图 5 所示。根据所求日负荷曲线，在快速充电站中配置储能，通过分时电

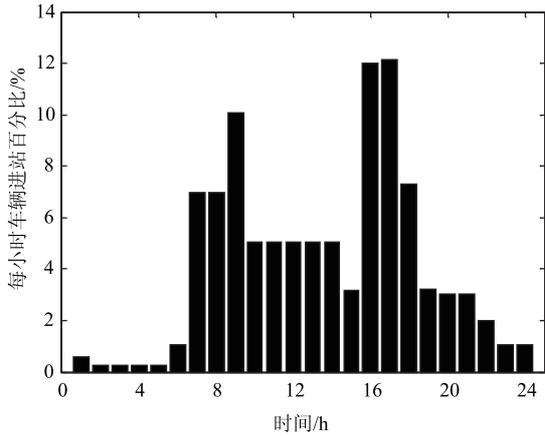


图 3 加油站车辆进站分布

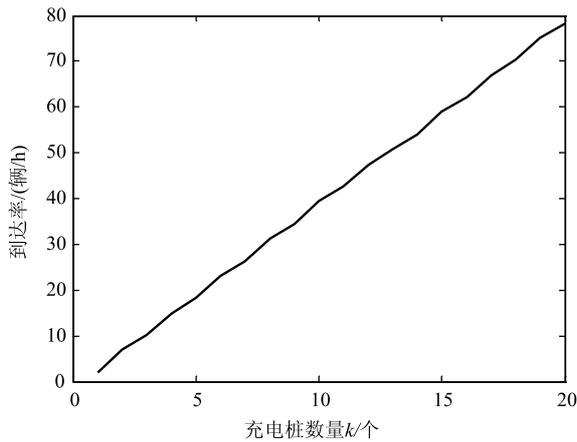


图 4 充电桩所对应的最大到达率

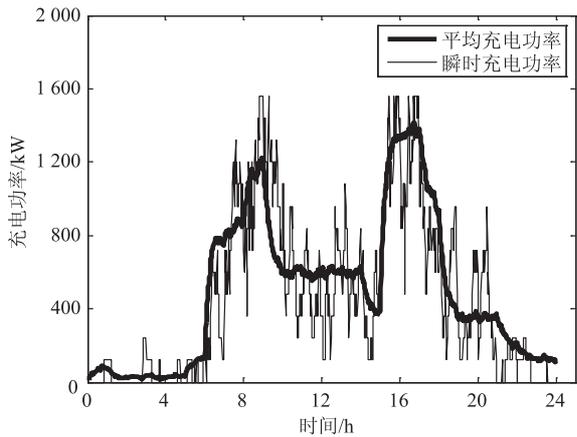


图 5 充电站日负荷曲线

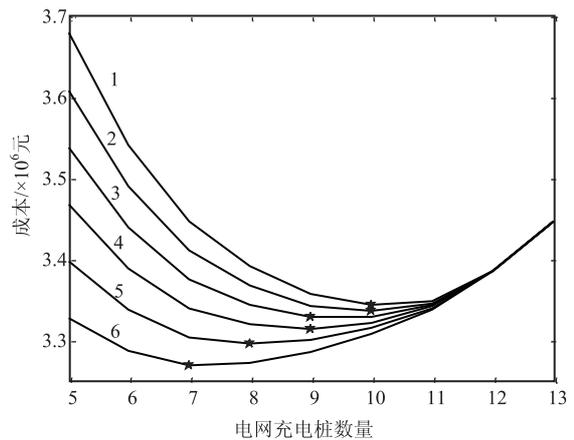
价，储能系统在低谷电价时充电形成套利，并减小充电站变压器和馈线容量所带来的收益，使快速充电站充电成本最低。求解目标函数可得出量化的电网直接充电的充电桩和储能补充的充电桩的分配比

例，为了保证储能系统在电网低电价时能够充满，根据式(13)~(14)可以确定电网充电桩 x 至少需要 5 个。

假设变压器、馈线和储能系统寿命均为 15a，现有锂离子电池储能成本约为 3 000 元/kWh，变压器和馈线成本 4 800 元/kW^[12]，贴现率 $\alpha=5\%$ 。对于储能式快速充电站充电分时电价划分如表 1 所示。根据日负荷曲线求解目标函数可得到电网直接充电的充电桩数量 $x=10$ ，则储能系统需要配置 3 个充电桩的容量，所提供的最大充电功率为 360kW，容量为 368kWh，可以看出没有达到平移负荷曲线的效果。随着储能技术的发展，储能成本逐渐降低，但变压器和馈线技术趋于成熟，成本基本保持不变，当储能成本降为 2 000 元/kWh 时，充电站系统最低成本所对应的电网充电桩为 7，即 $x=7$ ，此时储能系统提供的最大充电功率为 720kW，容量为 2 745kWh。随着储能系统成本的降低，系统最低成本时所配置的电网充电桩越少，如图 6 所示。

表 1 电价参数设置^[12]

时段	7:00—8:00	8:00—12:00	12:00—19:00	19:00—21:00	21:00—23:00	23:00—7:00
电网分时电价/(元/kWh)	0.5	0.8	0.5	1.2	0.8	0.25



注：曲线 1~6 对应储能成本分别为 3 000、2 800、2 600、2 400、2 200、2 000 元/kWh。

图 6 充电站成本

4 结束语

为了提高电网稳定性，避免快速充电站的随机

充电负荷,将储能系统应用于快速充电站。对于储能容量的确定,本文提出了一种充电机容量配置模型。根据传统加油站车辆进站统计数据对充电站充电负荷进行模拟,以储能式快速充电站成本最低为目标配置储能容量。通过算例分析可知,随着储能系统成本的降低,系统最低成本所对应的电网充电机数量减少,有效地平移了充电站充电负荷。

本文是基于传统加油站车辆到站分布模拟的充电负荷,没有考虑充电站对充电负荷采用引导充电措施,使系统成本更优化。当电动汽车规模化后,可根据实际充电站电动汽车进站统计数据进行负荷描述和储能容量配置。

参 考 文 献

- [1] 高赐威,张亮. 电动汽车充电对电网影响的综述[J]. 电网技术, 2011, 35(2): 127-131.
- [2] 薛飞,雷宪章,张野飏,等. 电动汽车与智能电网从V2G到B2G的全新结合模式[J]. 电网技术, 2012, 36(2): 29-34.
- [3] 李如琦,苏浩益. 基于排队论的电动汽车充电设施优化配置[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 58-61.
- [4] 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.
- [5] 所丽,唐巍,白牧可,等. 考虑削峰填谷的配电网集中型充电站选址定容规划[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(7): 1052-1060.
- [6] 周念成,蒲松林,王强钢. 电动汽车快速充电站的储能缓冲系统控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 127-134.
- [7] 赵俊华,文福拴,杨爱民,等. 电动汽车对电力系统的影响及其调度与控制问题[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 2-10, 29.
- [8] 娄宇成,张宇,贾玉健,等. 充放储一体化站对电网负荷削峰填谷作用的研究[J]. 电气自动化, 2013, 35(5): 41-43.
- [9] 杨敏霞,刘高维,房新雨,等. 计及电网状态的充放储一体化站运行模式探讨[J]. 电网技术, 2013, 37(5): 1202-1208.
- [10] 刘方,杨秀,时珊珊,等. 考虑不确定因素下含充换储一体化电站的微网能量优化[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 669-676.
- [11] Sanzhong Bai, Du Yu, Lukic S. Optimum design of an EV/PHEV charging station with DC bus and storage system [C]//Proceedings of IEEE Conference on Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Atlanta GA, 2010.
- [12] Huajie Ding, Zechun Hu, Yonghua Song. Value of the energy storage system in an electric bus fast charging station [J]. Applied Energy, 2015, 157: 630-639.
- [13] Safak Bayram, George Michailidis. Electric Power Allocation in a Network of Fast Charging Stations [J]. IEEE on selected areas in communications, 2013, 31(7): 1235-1246.
- [14] Moshe Zukerman. Introduction to Queueing Theory and Stochastic Teletraffic Models [M]. Hong Kong: City University of Hong Kong, 2015.
- [15] Yunus K, De La Parra H, Reza M. Distribution Grid Impact of Plug-In Electric Vehicles Charging at Fast Charging Stations Using Stochastic Charging Model [C]//Proceedings of the 2011-14th European Conference on Power Electronics and Applications, Birmingham, 2011.
- [16] Mauri G, Valsecchi A. The role of fast charging stations for electric vehicles in the integration and optimization of distribution grid with renewable energy sources [C]//Proceedings of CIRED Workshop Conference on Integration of Renewables into the Distribution Grid, Lisbon, 2012.

收稿日期: 2016-03-18

作者简介:

方超明(1991—),男,硕士研究生,研究方向为储能式快速充电站优化设计与能源管理策略, E-mail: fchaoming33@163.com;

张宇(1970—),男,高级工程师,研究方向为智能配用电, E-mail: zhangyu@sh.sgcc.com.cn;

王育飞(1974—),男,博士,副教授,研究方向为电力储能应用技术、电能质量分析与控制等, E-mail: wangyufei@shiep.edu.cn.

(责任编辑: 杨秋霞)