

# 考虑削峰填谷的电动出租车充电负荷影响因素调节方法

郭建龙<sup>1</sup>,文福拴<sup>2,3</sup>

(1. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640; 2. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027;

3. 文莱科技大学 电机与电子工程系, 文莱 斯里巴加湾 BE1410)

**摘要:** 针对电动汽车的有序充电调控, 从充电负荷影响因素调节的角度出发, 实现充电对配电系统的削峰填谷。以深圳市电动出租车为例, 依据车辆出行统计数据, 采用概率方法模拟电动出租车充电负荷。在此基础上, 以充电时间区间及其相应的开始充电时刻分布特性作为调节变量, 以配电系统负荷曲线最大峰谷差和负荷率作为调节的评价指标, 通过充电时段划分的差异性, 以及不同充电时段内开始充电时刻分布特性的变化, 提出了充电站内电动出租车充电对配电网削峰填谷的3种调节方法。不同方法下评价指标值的计算结果表明: 既要依据系统峰谷时段而调控充电区间, 又要在这些充电时段调节开始充电时刻分布特性, 且分布特性的选择与调控效果有关。

**关键词:** 电动出租车; 充电负荷; 影响因素; 削峰填谷

**中图分类号:** TM 73; U 469.72

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.08.033

## 0 引言

在推广应用电动汽车的大背景<sup>[1-3]</sup>下, 大量充电负荷接入电力系统会与其安全与经济运行带来新的挑战<sup>[4-6]</sup>, 电动汽车与电力系统之间的交互影响成为当前智能电网发展的研究热点之一。电动汽车充电负荷建模及其有序充电调控作为车电交互研究的重要组成部分, 特别是考虑削峰填谷的电动汽车的充电调控, 具有重要的经济技术价值。

在充电负荷模拟方面, 目前国内外诸多文献<sup>[7-11]</sup>均采用概率建模方法。文献<sup>[10]</sup>采用概率模拟方法选取电池初始荷电状态和开始充电时刻的数据, 基于概率模型对不同类型电动汽车充电负荷进行预测。但文献<sup>[10]</sup>假设电动出租车开始充电时刻在给定充电时段内服从直角梯形分布和均匀分布, 而文献<sup>[11]</sup>通过大量统计数据的拟合结果证实其服从正态分布。文献<sup>[11]</sup>依据电动出租车出行统计数据及其拟合结果, 提出了电动出租车日充电负荷概率估算模型。文献<sup>[7]</sup>计及了电价政策和车辆出行统计规律, 对不同场景下的充电功率需求进行了仿真计算, 但直接给定了开始充电时刻及其对应的概率, 有些缺乏理论和实际依据。

在有序充电调控方面, 文献<sup>[12]</sup>建立了以充电成本和充电投资最小为目标的多目标优化模型, 该模型主要考虑了充电站的最优布局和规模, 为充电空间有序性研究提供了参考。文献<sup>[13]</sup>针对高速公路

的车流情况和充电需求特点, 提出了高速公路充电站的规划模型, 以充电站充电的电动汽车数量期望最大为目标来进行充电站选址, 以充电站服务成本和顾客等待费用总和最小为目标来配置充电站内充电机数量。文献<sup>[14]</sup>给出了一种充电站布局两阶段优化方法, 首先把道路信息量化为一些数据点, 然后应用聚类分析方法确定覆盖城市主要道路的一些充电站址。文献<sup>[15]</sup>以有功网损最小为目标, 在满足充电需求的条件下, 计及配电网安全运行约束, 建立了充电优化模型, 主要从时间维度优化了充电负荷的接入。文献<sup>[16]</sup>基于网损最小、充电成本最小等目标, 综合提出了充电负荷在时间、空间上的最优分配模型。以上述文献为代表的多数研究, 主要考虑充电站最优选址定容、充电负荷在时间空间最优调度等以实现有序充电调控, 而专门研究考虑削峰填谷的有序充电调控的文献并不多。

文献<sup>[17]</sup>以每辆电动汽车每个时段的充电功率为变量, 以变压器负荷曲线峰谷差最小为目标, 提出了基于多智能体协同控制的电动汽车充电优化模型, 实现了电动汽车充电负荷的移峰填谷。文献<sup>[18]</sup>仅在集中型充电站选址定容二层规划模型中, 把削峰填谷作为下层规划模型中优化变量遵循的一个基本规则, 并没有对此大篇幅专门论述。文献<sup>[19]</sup>仅分析了车电互联削峰填谷的经济成本效益, 没有论及针对削峰填谷的充电调控方法, 特别是没有从充电负荷影响因素调节的角度出发来实现充电对系统的削峰填谷。

基于上述背景, 本文以深圳电动出租车为例, 采用概率方法模拟电动出租车充电负荷并用实际数据加以验证。在此基础上, 重点考虑充电对系统的削峰填谷, 从充电站充电负荷影响因素调节切入, 提出以

收稿日期: 2017-01-20; 修回日期: 2017-06-14

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2013CB228202); 国家自然科学基金资助项目(51361130152, 51477151)

Project supported by the National Basic Research Program of China(973 Program)(2013CB228202) and the National Natural Science Foundation of China(51361130152, 51477151)

充电时间区间及其相应的开始充电时刻分布特性作为调节变量,以配电系统负荷曲线最大峰谷差和负荷率作为调节的评价指标,针对性地提出 3 种调节方法:充电时段划分不变,相应的开始充电时刻分布特性变化;充电时段划分改变,相应的开始充电时刻分布特性不变;充电时段划分改变,相应的开始充电时刻分布特性变化。通过算例计算结果验证比较了 3 种调节方法对系统削峰填谷的效果,从充电负荷影响因素调节的角度出发,为有序充电的调控提供了理论依据和目标指向。

## 1 电动出租车充电负荷模拟

充电需求的准确模拟实际上取决于充电影响因素的随机特性及其之间的相互关系。

### 1.1 充电负荷影响因素分布特性

参照深圳市电动出租车日行驶里程统计数据拟合结果<sup>[11]</sup>,并经 Jarque-Bera 正态分布假设检验可知,电动出租车日平均行驶里程概率密度函数  $f(s)$  具体如下:

$$f(s) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} e^{-(s-\mu_s)^2/(2\sigma_s^2)} & s \in [50, 200]; t \in [00:00, 15:00] \\ \frac{1}{s\sqrt{2\pi}\sigma_s} e^{-(\ln s - \mu_s)^2/(2\sigma_s^2)} & s \in [30, 200]; t \in [15:00, 24:00] \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $s$  为电动出租车的日平均行驶里程(km),  $\mu_s$  为其均值,  $\sigma_s$  为其标准差。

参考文献[7],引入时间间隔系数  $\beta$ (单位为 d)来模拟相邻 2 次充电间的时间间隔,假设电池荷电量的下降与其日平均行驶里程呈线性关系,则下一次充电开始时电池初始荷电状态  $I_{\text{soc}}$  和日平均行驶里程  $s$  的约束关系为:

$$I_{\text{soc}} = \left(1 - \frac{\beta s}{M}\right) \times 100\% \quad (2)$$

其中,  $M$  为电池满电量情况下电动出租车的最大行驶里程。

式(2)的反函数如式(3)所示。

$$s = \frac{(1 - I_{\text{soc}})M}{\beta} \quad (3)$$

又因  $\left|\frac{ds}{dI_{\text{soc}}}\right| = \left|\frac{-M}{\beta}\right| = \frac{M}{\beta} > 0$ , 所以式(2)处处可导且严格单调,其反函数有连续导数。依据连续型随机变量函数的概率密度分布定理可得出,电动出租车初始荷电状态  $I_{\text{soc}}$  的概率密度函数如下:

$$f(I_{\text{soc}}) = f(s) \cdot \frac{(1 - I_{\text{soc}})M}{\beta} \left| \frac{ds}{dI_{\text{soc}}} \right| \quad (4)$$

将  $\frac{(1 - I_{\text{soc}})M}{\beta}$  和  $\left|\frac{ds}{dI_{\text{soc}}}\right|$  代入式(1),化简可得 2

个时段的电动出租车初始荷电状态概率密度函数如下:

$$f(I_{\text{soc}}) = \begin{cases} \frac{M}{\sqrt{2\pi}\sigma_s\beta} e^{-[I_{\text{soc}} - (1 - \beta\mu_s/M)]^2 / [2(\beta\sigma_s/M)^2]} & t \in [00:00, 15:00] \\ \frac{1}{(1 - I_{\text{soc}})\sqrt{2\pi}\sigma_s} e^{-[\ln[(1 - I_{\text{soc}})M/\beta] - \mu_s]^2 / (2\sigma_s^2)} & t \in [15:00, 24:00] \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $f(I_{\text{soc}})$  为电池初始荷电状态概率密度函数。

由文献[11]对深圳市电动出租车开始充电时刻的统计及假设检验可知,电动出租车开始充电时刻在一天内满足分时段概率分布特点,且均服从正态分布,具体如式(6)所示。

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_t} e^{-(t-\mu_t)^2/(2\sigma_t^2)} \quad (6)$$

其中,  $t \in \{[00:00, 09:00] \cup [09:00, 15:00] \cup [15:00, 19:00] \cup [19:00, 24:00]\}$ ;  $\mu_t$  和  $\sigma_t$  分别为开始充电时刻的均值和标准差;  $f(t)$  为开始充电时刻概率密度函数。

上述分布特性的具体参数可参考文献[11]统计数据的拟合结果,关于其他车型及其应用场景的分布特性及参数可参考文献[20]。

### 1.2 充电负荷概率模型

考虑充电的延续性,需要确定特定充电方式下对应的充电持续时间,记作  $L$ (单位为 h)。一天内充电时刻划分的颗粒度用相邻两充电时刻的时间间隔  $I$ (单位为 h)表示。假设一天被划分为  $n$  个时间段,则可得到:

$$I = \frac{24}{n} \quad n \text{ 取整数且 } n \geq 1 \quad (7)$$

定义对任意  $t$  时刻充电概率有影响的之前时间点共有  $Q$  个,则:

$$Q = \begin{cases} 0 & I > L \\ \lceil L/I \rceil & I \leq L \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $\lceil \cdot \rceil$  表示取整运算。

考虑充电持续性对充电负荷在时间维度的累加效应,根据电池初始荷电状态分布特性和开始充电时刻分布特性,一天内在某  $t$  时刻电动出租车充电概率  $p(t)$  可表示为:

$$p(t) = f(I_{\text{soc}}) \sum_{k=0}^Q f(t-k) \quad (9)$$

其中,  $t-k$  表示  $t$  时刻前的第  $k$  个时间点。

故在某  $t$  时刻单台电动汽车的充电负荷期望值  $d(t)$  可用式(10)求取。

$$d(t) = p(t)P \quad (10)$$

其中,  $P$  为单台电动汽车的充电功率。

由大数定律可知,假设  $N$  台电动汽车之间的充电行为彼此独立,则  $N$  台电动汽车的充电负荷期望收

敛于单台电动汽车充电负荷的  $N$  倍,由此就可求得一天内不同时刻一定数量电动汽车的充电负荷。

### 1.3 算例验证

基于上述建立的电动出租车充电负荷概率模型,以深圳市电动出租车实际运营情况为例进行仿真计算,并与深圳市电动出租车某充电站后台监控采集数据<sup>[11]</sup>做对比验证。

#### 1.3.1 算例基本情况

算例基本情况如下:

- a. 电动出租车一天内充电 2 次;
- b. 电动出租车采用快速充电方式,假定每次充电持续时长为 1 h;
- c. 电动出租车充电功率取值为 32 kW,电池满电量的最大行驶里程为 300 km;
- d. 为了与实际数据做同一数量级的对比验证,充电站电动出租车的数量取为 45 台;
- e. 一天内以 0.5 h 为时间间隔;
- f. 假定配电系统容量充足。

#### 1.3.2 计算结果

基于上述初始化数据以及电动出租车充电负荷概率模型,采用 ORACLE 商业软件 CRYSTAL-BALL<sup>[21]</sup>进行蒙特卡洛抽样仿真,采样 10000 次,计算得出深圳市电动出租车充电站日充电负荷模拟数据如图 1 所示。

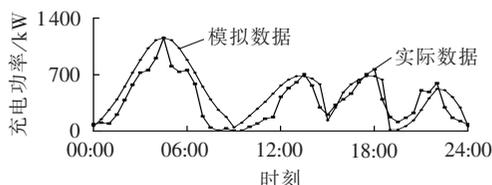


图 1 充电负荷模拟值与实际值的对比

Fig.1 Comparison between simulative and actual charging loads

从图 1 可知,在一天内,充电负荷模拟数据的分布趋势和充电功率幅值与实际数据相接近。可见,本文提出的概率模型可以对特定应用场景的充电负荷进行有效预测,该方法也可推广到其他类型汽车及其应用场景。

## 2 调节策略

当未采取有序充电控制等干预措施时,充电负荷叠加到配电系统后,可能会出现峰峰叠加,峰谷差进一步扩大,负荷率降低,进一步会导致配变过载和线路超限等,功率损失和电压偏移会加大,所以有必要考虑充电对系统的削峰填谷。

### 2.1 调节变量

由第 1 节的负荷模拟可知,影响充电负荷分布特性的主要因素是充电时段的划分及其相应的开始充

电时刻分布特性,以及电池初始荷电状态分布特性等,具体表现为:

$$P_d = Pf(I_{soc}) \sum_{k=0}^Q f(t-k)N \quad (11)$$

其中,  $t \in \{[00:00, 09:00] \cup [09:00, 15:00] \cup [15:00, 19:00] \cup [19:00, 24:00]\}$ ;  $P_d$  为  $N$  台车的充电功率需求。从式(11)可知,充电负荷在一天内的分布与式(11)等号右边的分项有关。

a.  $P$  和  $N$  与具体充电场景有关,且为定值;

b.  $f(I_{soc})$  为电池初始荷电状态,是一个对应不同时间段的分布概率函数,但其主要取决于车辆在上一次充电后的实际使用情况,考虑到满足电动出租车用户出行需求是基本前提,所以对初始荷电状态分布特性进行调控的可行性低;

c.  $f(t)$  为充电时段及其相应的开始充电时刻分布特性,在有序充电调控策略下,可以通过多种调控措施加以引导,是可调节的变量,是调节电动出租车充电负荷分布的关键变量。

### 2.2 评价指标

通过对充电负荷影响因素的调节,使得充电负荷叠加到配电系统后系统最大峰谷差减小,负荷率提高,从而实现充电对系统的削峰填谷。

为了评估充电站内电动出租车充电负荷对系统削峰填谷的效果,本文引入配电系统负荷曲线最大峰谷差(标幺值,后同)和负荷率 2 个评价指标,分别用  $G_{\max}$  和  $K_m$  表示,具体分别如式(12)和式(13)所示。

$$G_{\max} = P_{\max} - P_{\min} \quad (12)$$

$$K_m = P_{av} / P_{\max} \quad (13)$$

其中,  $P_{\max}$ 、 $P_{\min}$  和  $P_{av}$  分别为配电系统负荷曲线的最大、最小和平均负荷。

### 2.3 调节方法

根据文献[11],深圳市电动出租车在非调控充电状态下,开始充电时刻的分布特性在时段 00:00—09:00、09:00—15:00、15:00—19:00、19:00—24:00 满足分时段概率分布特点,且都服从正态分布。以充电时段及其相应的开始充电时刻分布特性作为调节变量,遵循调节变量定义域存在的客观性,以削峰填谷为目标,根据调节变量的变化组合,主要有以下 3 种方法。

a. 方法 1: 充电时段划分不变,相应的开始充电时刻分布特性变化。

调节模式 1: 根据文献[10],电动出租车开始充电时刻的分布服从均匀分布。

调节模式 2: 针对典型配电网的负荷分布特性,在凌晨时段是负荷低谷,而在日间上午、下午及晚上是负荷高峰,按照削峰填谷的干预目标,在配电网负荷低谷时段引导充电,而在系统峰荷时段避免集中

充电。则充电开始时刻在凌晨时段满足正态分布、而在其余时段满足均匀分布。方法 1 的具体示意图如图 2 所示。图中,  $T$  为电动汽车开始充电时刻分布特性;  $t_a$  为充电的起始时刻;  $t_b$  为充电的终止时刻。

**b. 方法 2:** 充电时段划分改变, 相应的开始充电时刻分布特性不变。

调节模式 1: 针对典型配电网的负荷分布特性, 负荷低谷时段主要集中在凌晨 00:00—07:00, 而在时段 07:00—12:00、12:00—18:00、18:00—24:00 会出现负荷高峰。以配电网峰谷时段作为充电分布时间区间, 而相应时段的开始充电时刻分布特性不变。方法 2 的具体示意图如图 3 所示。

**c. 方法 3:** 充电时段划分改变, 相应的开始充电时刻分布特性变化。

综合上述 2 种方法, 在有序充电调控措施的干预下, 假定充电时段及其相应的开始充电时刻分布特性都发生改变, 则主要有以下 2 种调节模式。

调节模式 1: 开始充电时刻在时段 00:00—07:00、07:00—12:00、12:00—18:00、18:00—24:00 均满足均匀分布。

调节模式 2: 开始充电时刻在时段 00:00—07:00

满足正态分布, 而在其他时段满足均匀分布。方法 3 的具体示意图如图 4 所示。

### 3 算例

根据上述分析, 以深圳市电动出租车充电站日充电负荷为基础, 以充电站内电动汽车集聚体充电行为为调节单元, 基于本文提出的充电负荷影响因素调节方法, 实现充电站内充电对系统的削峰填谷。充电站间的协同控制已有诸多研究报道<sup>[15-17]</sup>可供参考, 进而可实现更大区域内电动出租车有序充电。

#### 3.1 算例介绍

以单个充电站内的充电调控为例, 采用的配电变压器为容量是 1250 kV·A 的 10 kV/0.4 kV、SH15-M 油浸式变压器, 低压侧连接由 14 台单台容量为 66 kW 充电机承担的充电站充电负荷和本地常规负荷。对照配电变压器的典型常规负荷曲线<sup>[22]</sup>, 进一步计算上述 3 种不同调节方法下的充电负荷叠加到配电系统后的评价指标值。各种调节方法对应计算得到的指标值的比较基准是未经调控下的充电负荷叠加到系统后的评价指标值, 其中最大峰谷差为 0.43 p.u., 负荷率为 0.81。

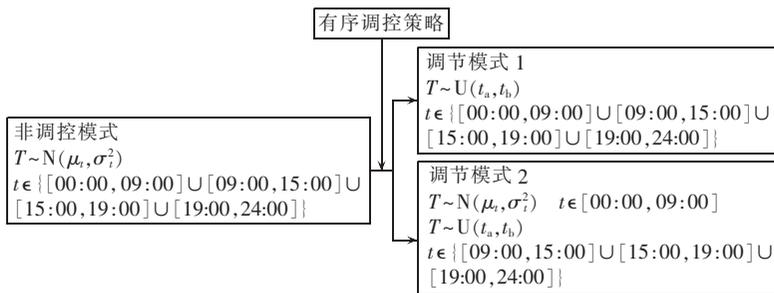


图 2 调节方法 1 示意图

Fig.2 Schematic diagram of regulation method one

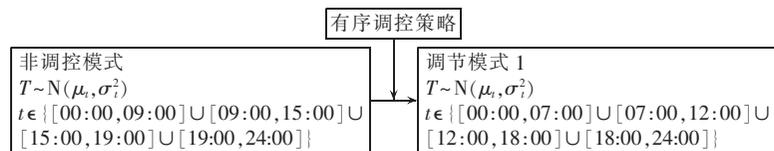


图 3 调节方法 2 示意图

Fig.3 Schematic diagram of regulation method two

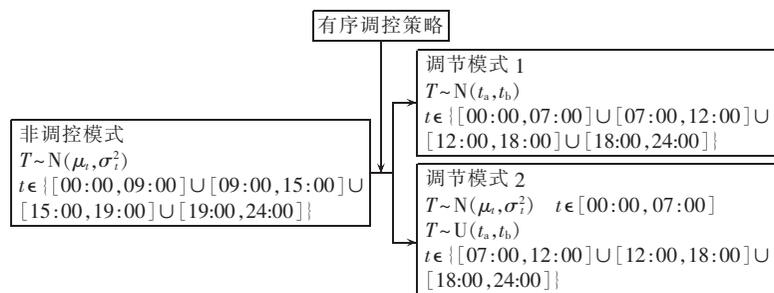


图 4 调节方法 3 示意图

Fig.4 Schematic diagram of regulation method three

### 3.2 结果分析

根据第 2 节所提的不同调节方法的具体思路,计算得到的评价指标值如表 1 所示。

表 1 不同调节方法算例计算结果  
Table 1 Calculated results of different regulation methods

调节方法		$G_{\max}$	$K_m$
方法 1	调节模式 1	0.45	0.83
	调节模式 2	0.40	0.83
方法 2	调节模式 1	0.48	0.79
	调节模式 2	0.38	0.88
方法 3	调节模式 1	0.38	0.88
	调节模式 2	0.44	0.86

从表 1 的计算结果可知,对比未经调控下的充电负荷叠加后的配电系统评价指标值,在方法 1 调节模式 2 调控下,最大峰谷差由 0.43 p.u. 减小为 0.40 p.u., 负荷率由 0.81 提高到 0.83,说明充电对配电系统有明显的削峰填谷的效果。基于方法 2 单纯地调控充电时段,最大峰谷差会增加,负荷率略有下降,说明该方法不能实现充电对系统的削峰填谷。将充电时段的调控与各时段开始充电时刻的分布引导相结合,按照方法 3 中调节模式 1 调控,依据系统峰谷时段对充电时段进行调整,各时段开始充电时刻均服从均匀分布,可以进一步地优化充电负荷的分布,使得充电负荷叠加到系统后最大峰谷差减小,负荷率提高,较好地实现了充电对系统的削峰填谷。

对比方法 1 调节模式 2 和方法 3 调节模式 1 的评价指标值,后者的优化效果更好,叠加不同调节方法作用下的充电负荷后的配电网日负荷(标么值,下同)曲线如图 5 所示。由图 5 可知,对原配电系统充电负荷分布的调控,既要依据系统峰谷时段而调控充电时段,也要在这些充电时段调节开始充电时刻的分布特性,且分布特性的选择与调控效果有关,这样对应调控下的充电负荷对原配电系统能有较好的削峰填谷的作用。

此外,采用其他调节方法时,相比于非调控充电状态,调节效果并不明显。特别是采用方法 2 时,仅

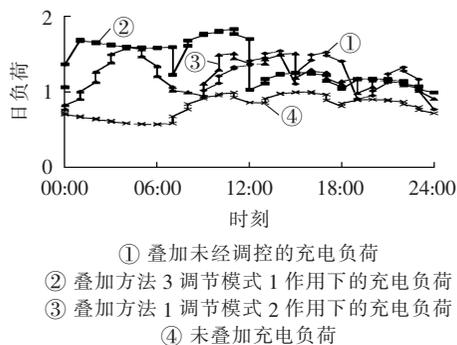


图 5 调节方法 1 和调节方法 3 作用下的配电网日负荷

Fig.5 Daily loads of distribution network by regulation method one and three

仅调节了充电时段,除凌晨时段外,其余时段充电负荷与原系统峰荷叠加,结果导致最大峰谷差进一步增大,负荷率降低,调节的效果很差,具体如图 6 所示。

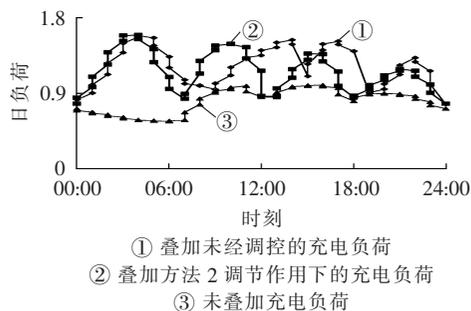


图 6 调节方法 2 作用下的配电网日负荷  
Fig.6 Daily loads of distribution network by regulation method two

## 4 结论

本文对电动出租车充电负荷进行了准确模拟,并用深圳市电动出租车运营实际数据加以验证。在此基础上,以充电对系统的削峰填谷为目标,以充电时段及其相应的开始充电时刻分布特性作为调节变量,针对性地提出了 3 种方法并计算了对应的评价指标值,从充电站内充电负荷影响因素调节角度分析了充电对系统削峰填谷的内在机理,主要工作如下。

a. 依据电动出租车出行统计数据,采用概率方法模拟电动汽车充电负荷,考虑了充电延续性对充电负荷在时间维度上的累加效应,实现对充电负荷的准确模拟。

b. 以充电时段及其相应的开始充电时刻分布特性作为调节变量,以配电系统负荷曲线最大峰谷差和负荷率为充电对系统削峰填谷的评价指标,从充电负荷影响因素调节的角度出发,为充电站内充电对系统削峰填谷提供了理论依据和调节目标指向。

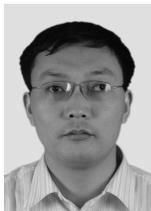
c. 为合理利用充电对配电系统进行削峰填谷,既要依据系统峰谷时段而调控充电时段,同时也要在这些充电时段调节开始充电时刻分布特性,且分布特性的选择与调控效果有关。若仅仅调控充电时段,很难对原配电系统有较好的削峰填谷作用。

### 参考文献:

- [1] 胡泽春,宋永华,徐智威,等. 电动汽车接入电网的影响与利用[J]. 中国电机工程学报,2012,32(4):1-10.  
HU Zechun, SONG Yonghua, XU Zhiwei, et al. Impacts and utilization of electric vehicles integration into power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 1-10.
- [2] SCOTT M, HOPKINS D, STEPHENSON J. Understanding sustainable mobility: the potential of electric vehicles[C]//2014 IEEE 15th International Conference on Mobile Data Management. Brisbane, Australia: IEEE, 2014: 27-30.
- [3] 陈静鹏,朴龙健,艾芊. 基于改进贪心算法的大规模电动汽车充

- 电行为优化[J]. 电力自动化设备,2016,36(10):38-44.
- CHEN Jingpeng,PIAO Longjian,AI Qian. Charging optimization based on improved greedy algorithm for massive EVs[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(10):38-44.
- [4] 郭建龙,文福拴. 电动汽车充电对电力系统的影响及其对策[J]. 电力自动化设备,2015,35(6):1-9.
- GUO Jianlong,WEN Fushuan. Impact of electric vehicle charging on power system and relevant countermeasures[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(6):1-9.
- [5] 王建,吴奎华,刘志珍,等. 电动汽车充电对配电网负荷的影响及有序控制研究[J]. 电力自动化设备,2013,33(8):47-52.
- WANG Jian,WU Kuihua,LIU Zhizhen,et al. Impact of electric vehicle charging on distribution network load and coordinated control[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(8):47-52.
- [6] 赵胜霞,刘俊勇,向月,等. 考虑配电网接纳能力的电动汽车充放电服务网基础设施配置方案分析与评估[J]. 电力自动化设备,2016,36(6):94-101.
- ZHAO Shengxia,LIU Junyong,XIANG Yue,et al. Analysis and assessment considering accommodation capability of distribution network for infrastructure deployment of EV charging/swapping service network[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(6):94-101.
- [7] QIAN K,ZHOU C,ALLAN M,et al. Modeling of load demand due to EV battery charging in distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2011,26(2):802-810.
- [8] 周念成,熊希聪,王强钢. 多种类型电动汽车接入配电网的充电负荷概率模拟[J]. 电力自动化设备,2014,34(2):1-7.
- ZHOU Niancheng,XIONG Xicong,WANG Qianggang. Simulation of charging load probability for connection of different electric vehicles to distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(2):1-7.
- [9] 张振夫,黄小庆,曹一家,等. 考虑分时电价的电动汽车充电负荷计算[J]. 电力自动化设备,2014,34(2):24-29.
- ZHANG Zhenfu,HUANG Xiaoqing,CAO Yijia,et al. Charging load calculation considering TOU for electric vehicles[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(2):24-29.
- [10] 罗卓伟,胡泽春,宋永华,等. 电动汽车充电负荷计算方法[J]. 电力系统自动化,2011,35(14):36-42.
- LUO Zhuowei,HU Zechun,SONG Yonghua,et al. Study on plug-in electric vehicles charging load calculating[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(14):36-42.
- [11] 李亚芬,黄梅,张维戈. 电动出租车日充电负荷估算方法[J]. 电力系统自动化,2014,38(10):55-60.
- LI Yafen,HUANG Mei,ZHANG Weige. An estimation method for daily charging load of electric taxis[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(10):55-60.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] STEEN D,TUAN L A,CARLSON O,et al. Assessment of electric vehicle charging scenarios based on demographical data[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2012,3(3):1457-1468.
- [15] 杨秀菊,白晓清,李佩杰,等. 电动汽车规模化接入配电网的充电优化[J]. 电力自动化设备,2015,35(6):31-36.
- YANG Xiuju,BAI Xiaoqing,LI Peijie,et al. Charging optimization of massive electric vehicles in distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(6):31-36.
- [16] 张谦,刘超,周林,等. 计及可入网电动汽车最优时空分布的双层经济调度模型[J]. 电力系统自动化,2014,38(20):40-45.
- ZHANG Qian,LIU Chao,ZHOU Lin,et al. A bi-level economy dispatch model considering temporal and spatial optimal distribution of electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(20):40-45.
- [17] 许少伦,严正,冯冬涵,等. 基于多智能体的电动汽车充电协同控制策略[J]. 电力自动化设备,2014,34(11):7-13.
- XU Shaolun,YAN Zheng,FENG Donghan,et al. Cooperative charging control strategy of electric vehicles based on multi-agent[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(11):7-13.
- [18] 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.
- SUO Li,TANG Wei,BAI Muke,et al. Locating and sizing of centralized charging stations in distribution network considering load shifting[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(7):1052-1060.
- [19] 孙波,廖强强,谢品杰,等. 车电互联削峰填谷的经济成本效益分析[J]. 电网技术,2012,36(10):30-34.
- SUN Bo,LIAO Qiangqiang,XIE Pinjie,et al. A cost-benefit analysis model of vehicle-to-grid for peak shaving[J]. Power System Technology,2012,36(10):30-34.
- [20] US Department of Transportation,Federal Highway Administration. 2009 national household travel survey[EB/OL]. (2011-06-20) [2017-01-10]. <http://nhts.orl.gov/2009/pub/stt.pdf>.
- [21] ORACLE. Crystal-ball user manual[EB/OL]. (2015-12-24) [2017-01-10]. <http://www.oracle.com/technetwork/cn/middleware/crystal-ball/documentation/index.html>.
- [22] 熊希聪,王强钢,周念成,等. 基于谐波解析的电动汽车充电对配电变压器影响概率评估方法[J]. 电网技术,2015,39(8):2283-2290.
- XIONG Xicong,WANG Qianggang,ZHOU Niancheng,et al. Probability assessment of electric vehicle charging impact on distribution transformer based on harmonic analysis[J]. Power System Technology,2015,39(8):2283-2290.

## 作者简介:



郭建龙

郭建龙(1982—),男,山西兴县人,博士研究生,主要研究方向为电动汽车充电负荷建模及其对配电系统的影响优化(E-mail: guojl5103@163.com);

文福拴(1965—),男,河南安阳人,教授,博士研究生导师,博士,主要从事电力系统故障诊断与系统恢复、电力经济与电力市场、智能电网与电动汽车等方面的研究工作

(E-mail: fushuan.wen@gmail.com)。

## Methods of influencing factor regulation considering load shifting for electric taxis charging load

GUO Jianlong<sup>1</sup>, WEN Fushuan<sup>2,3</sup>

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 3. Department of Electrical and Electronic Engineering, Universiti Teknologi Brunei, Bandar Seri Begawan BE1410, Brunei)

**Abstract:** For the coordinated charging of EVs(Electric Vehicles),the influencing factors of charging load can be regulated to realize the load shifting of distribution system. As an example,the probabilistic method is adopted to simulate the charging load of Shenzhen electric taxis based on their travel statistics. The charging interval and distribution of corresponding startup time are taken as the variables of regulation,while the maximum peak-valley difference of load curve and the load rate are taken as the evaluation indexes of regulation. Based on the difference of charging interval and the distribution variation of corresponding startup time,three regulation methods are presented for the load shifting of distribution system by charging the electric taxis in the charging station. The calculated evaluation indexes of different methods show that,the charging interval should be regulated according to the peak and valley periods and the distribution of startup time should also be regulated for the corresponding charging interval;the selection of distribution concerns the regulation effect.

**Key words:** electric taxis; charging load; influencing factors; load shifting