

DOI: 10.7667/PSPC171091

峰谷分时电价背景下的居民电动汽车有序充放电策略

严俊, 严凤

(华北电力大学(保定), 河北 保定 071003)

摘要: 针对现有电动汽车充电策略未考虑充电负荷超过供电容量的现实问题, 提出一种包含功率限制的电动汽车有序充放电策略。该策略以峰谷分时电价为背景, 通过电动汽车向电网进行馈电以及对电动汽车的充电功率进行限制, 使居民用电的总负荷曲线趋于平缓, 更好地起到削峰填谷的作用。同时在配电设施容量不增加的情况下, 提高接纳规模化电动汽车充电的能力。最后通过蒙特卡洛仿真对算例进行分析, 证实所提出的包含功率限制的电动汽车有序充放电策略较原有策略更具实用性。

关键词: 峰谷分时电价; 电动汽车; 有序充放电策略; 功率限制; 日负荷曲线

An orderly charging and discharging strategy for residential electric vehicles based on peak-valley electricity tariffs

YAN Jun, YAN Feng

(North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Aiming at the problem that the existent charging strategies does not consider that the charging load exceeds the supply capacity of power distribution facilities, an orderly charging and discharging strategy based on peak-valley electricity tariffs for electric vehicles with power limitation is proposed. And the residents' load curve tends to be smooth by electric vehicles' feeding behavior and the power limitation in this strategy, which can also have the stronger ability to peak shaving and valley filling. At the same time, the capacity of large-scale electric vehicle charging can be improved without increasing the capacity of power distribution facilities. Finally, the Monte Carlo method is used to simulate the example, verifying that orderly charging and discharging strategy with power limitation proposed in this paper is more practical than original strategy.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0902203).

Key words: peak-valley electricity tariffs; electric vehicles; orderly charging and discharging strategy; power limitation; daily load curve

0 引言

随着环境污染的日益严重, 电动汽车以其零污染、零排放的优点获得政府的大力推广与扶持^[1], 使得电动汽车的数量显著增加。然而电动汽车充电的随机性和聚集特性会使电网出现负荷过大的现象。尤其是电动汽车渗透率^[2]较高的城市住宅区内, 受用车规律^[3-4]影响, 用户充电时间的重叠或用电高峰时段的充电行为将会导致峰谷差增大, 加重配电网负担^[5-6]。因此合理的有序充电策略具有重要意义。

目前关于电动汽车有序充电的研究如下: 文献

[7-9]以公共充电站内电动汽车的充电行为为基础, 以充电期望满足程度为限制条件, 以站内投资运营者收益最大化为目标建立有序充电优化模型。考虑有序充电策略实施后的效果问题, 文献[10]针对用户有临时增加充电请求的情况, 制定了基于不同时段内充电请求预测补偿的有序充电策略, 对已有充电策略的实施效果进一步优化。为鼓励电动汽车用户利用夜间闲置的谷时段电能, 文献[11]以对日负荷曲线削峰填谷的效果最优为目标, 建立了以峰谷分时电价为引导手段的充电时间选择模型, 并通过智能算法的优化得到相应的有序充电策略。以上研究仅针对有序充电, 没有考虑电动汽车的馈电行为, V2G技术可进一步改善电动汽车用电行为, 文献[12]

通过阐述电池与电网进行能量互换的原理, 详细介绍了 V2G 的观点与意义。文献[13-14]通过对电动汽车放电行为经济性的分析, 确定了以用户利益最大化为目标, 包含 V2G 技术的电动汽车充放电电价合理范围。然而以上研究未能将峰谷分时电价特性与 V2G 技术很好地结合起来, 纳入有序充放电策略中。同时以上策略均在电动汽车以额定功率充电的基础上制定, 未灵活考虑不同情况下通过改变充放电功率来避免可能造成的充电“新高峰”。

本文以位于住宅区的居民电动汽车为主体, 通过对其出行规律以及民众用电行为的习惯归纳, 分析居民在峰谷分时电价背景下的日负荷曲线, 提出一种包含功率限制的居民电动汽车有序充放电策略。运用蒙特卡洛法对本文形成的有序充放电策略进行仿真, 通过仿真分析表明, 该有序充放电策略不仅具有降低峰谷差率与“削峰填谷”的作用, 同时有较高的电动汽车接纳能力, 更贴近实际情况。

1 峰谷分时电价与有序充放电策略

峰谷分时电价是根据负荷变动情况, 将 24 h 划分为不同时段, 对不同时段分别制定相应的收费标准^[12]。目前, 峰谷分时电价已在我国的居民用电中得到推广, 旨在鼓励用户有选择地避开用电高峰, 消费电费低廉的谷时段电力。

电动汽车数量的增加必将导致高渗透率的居民区总用电负荷增加, 乃至超过该区域内配电设施容量限值, 这不仅带来经济损失, 而且危及电网安全^[16-17]。对于已建成的规模化居民区用户, 配电变压器等设施已安装完毕且容量确定, 增容耗费人力物力; 对于待建居民区而言, 虽可选择大容量的配电网设备但会造成浪费。

如图 1 所示, 以某居民区在一定电动汽车持有量下的居民负荷曲线为例, 当电动汽车无序充电时, 红色负荷曲线在很大一段时间内超过该居民区配电设施容量限值, 出现“峰上加峰”的现象; 这是由于未充分利用峰谷分时电价, 将电动汽车的储能特性考虑在内, 没有加入馈电行为造成的。同样, 用绿色表示的正序充电^[18]下的负荷曲线也在较短的时段内向上超越配电设施容量相关值, 形成用电“新高峰”; 这是由于谷时段开始时刻同时接入大量待充电车辆, 未考虑限制车辆的充电功率造成的。换言之, 在配电设施不扩容的情况下, 该居民区无法接纳此接入规模的电动汽车充电负荷。

为解决常见的充电方式在峰谷分时电价背景下存在的缺点, 对于电动汽车持有量增速较快的居民区, 需要一种考虑配电设备容量的电动汽车有序充

放电策略。该策略应当在不影响下次出行的前提下, 接纳大规模的用户, 同时具有更好的削峰填谷作用。因此本文提出一种包含功率限制的基于峰谷分时电价的有序充放电策略。

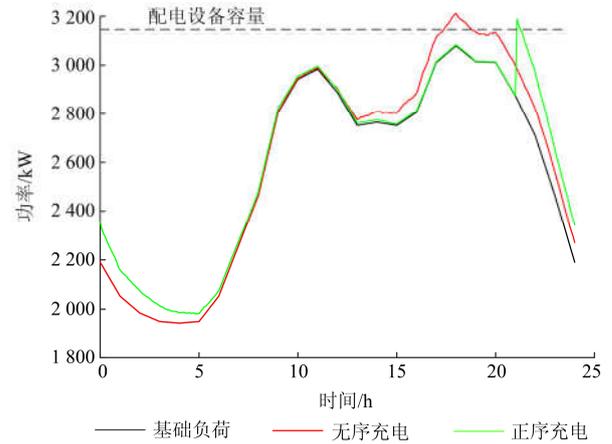


图 1 峰谷分时电价背景下不同充电方式的负荷曲线示意图
Fig. 1 Load curve of different charging strategies under the peak-valley electricity tariffs

2 居民电动汽车负荷建模

位于住宅区的电动汽车在不受任何调控手段与控制策略的引导下, 其充电规律主要受到居民日常生活习惯及出行规律等因素的影响。

根据美国交通部对全美家庭用车的调查结果^[19], 通过最大似然估计可近似认为住宅区内电动汽车最后返程时刻这一随机变量服从参数为 $N(\mu_s, \sigma_s^2)$ 的正态分布, 其概率密度函数可表示为

$$f_s = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x_1 - \mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right], \mu_s - 12 < x_1 \leq 24 \\ \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x_1 + 24 - \mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right], 0 < x_1 < \mu_s - 12 \end{cases} \quad (1)$$

式中: x_1 为用户返回时刻; σ_s 为标准差, 取 3.4; μ_s 为期望值, 取 17.6。

根据文献[20]分析可得, 电动汽车日行驶里程这一随机变量为服从参数为 $N(\mu_D, \sigma_D^2)$ 的正态分布, 其概率密度函数可表示为

$$f_D(L) = \frac{1}{L\sigma_D\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln L - \mu_D)^2}{2\sigma_D^2}\right] \quad (2)$$

式中: L 为日行驶里程; σ_D 为标准差, 取 3.20; μ_D 为期望值, 取 0.88。居民电动汽车日行驶里程概率密度分布如图 2 所示。

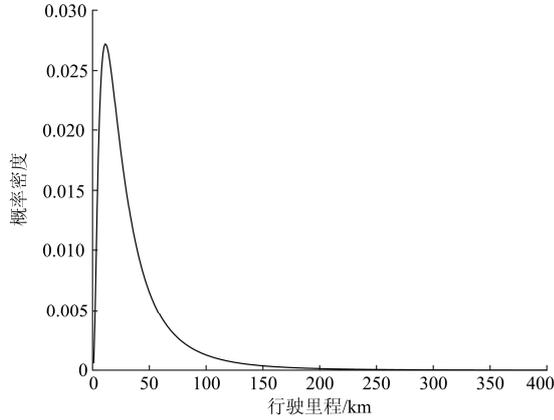


图2 居民电动汽车日行驶里程概率密度分布图
Fig. 2 Probability density of residential electric vehicles driving distance during one day

通过对电动汽车行驶和充电规律的统计^[21], 通过分析认为返回小区时剩余电量这一随机变量近似服从参数为 $N(\mu_c, \sigma_c^2)$ 的正态分布, 其概率密度函数可表示为

$$f_c(c) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_c} e^{-\frac{(c-\mu_c)^2}{2\sigma_c^2}} \quad (3)$$

式中: c 为剩余电量; σ_c 为标准差, 取 0.177 2; μ_c 为期望值, 取 0.513 7。居民电动汽车返回小区时剩余电量的概率密度分布如图 3 所示。

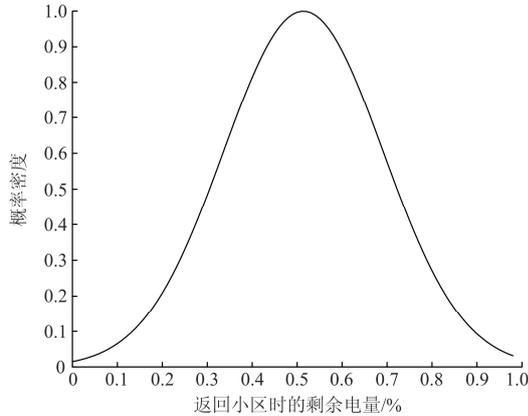


图3 居民电动汽车返回时剩余电量的概率密度分布图
Fig. 3 Probability density of remaining electric energy of residential electric vehicle when returning

3 有序充放电策略

本文的有序充放电策略按照用户返回时刻的不同分为峰时返回策略和谷时返回策略。假定电动汽车谷时段充电开始时刻起到下一次出行的全程时间为谷时段充电时间, 记为 T , 如式(4)表示。

$$T = \begin{cases} T_{\text{谷}}, & 9 < t_r \leq 21 \\ |t_r - \text{下次出行时刻}|, & 21 < t_r \leq 24 \text{ 或 } 0 \leq t_r \leq 9 \end{cases} \quad (4)$$

式中: t_r 为当前返程时刻; $T_{\text{谷}}$ 为完整的谷时段, 本文中取 12 h。同时本文提出临界剩余电量的概念, 记为 SOC_2 , 该临界剩余电量用来描述谷时段开始充电前为满足用户下一次出行, 所需剩余电量最小值。其表达式为

$$\text{SOC}_2 = \frac{\frac{LW_{100}}{100} - T_{\text{谷}}P_c}{P_0} \quad (5)$$

式中: L 为日行驶里程, 单位为 km; W_{100} 为每百公里耗电量, 单位为 $\text{kW}\cdot\text{h}$; P_c 为充电功率, 单位为 kW ; P_0 为居民电动汽车额定容量。

3.1 针对峰时返回人群的有序充放电策略

对于峰时段内返回住宅区的电动汽车用户, 制定的有序充放电策略如下。

1) 若用户返回住宅区时的剩余电量 SOC_1 大于临界剩余电量 SOC_2 , 此时的策略可概括为: 先放电至谷时段来临再充电。

用户首先将电动汽车接入充电桩向电网放电, 其中放电量为

$$W_1 = \text{SOC}_1 - \text{SOC}_2 \quad (6)$$

即电动汽车的放电过程从剩余电量 SOC_1 下降到临界剩余电量 SOC_2 时结束; 同时为保证放电过程的平稳性, 放电功率 P_r 由智能电表和充电桩共同控制, 其表达式为

$$P_r = \frac{W_1}{(21 - t_r)} \quad (7)$$

在上述过程中, 若 P_r 超过最大放电功率 $P_{r\text{max}}$, 则使其以 $P_{r\text{max}}$ 完成放电, 直至峰时段结束。

然后, 用户将在谷时段开始时进行充电, 其充电功率为

$$P_{c1} = \frac{\frac{LW_{100}}{100} - \text{SOC}_2 \cdot P_0}{T} \quad (8)$$

2) 若用户返回住宅区时的剩余电量 SOC_1 小于临界剩余电量 SOC_2 , 为保证电动汽车下次出行时有足够的剩余电量, 此时的策略应为: 选择一部分峰时段和全部谷时段向电动汽车充电。其中充电量为

$$W_2 = \text{SOC}_2 - \text{SOC}_1 \quad (9)$$

即表明电动汽车的充电过程在剩余电量上升至

临界剩余电量 SOC_2 时结束。同时, 为在充电过程中减少峰时段用电的压力, 其充电过程的功率 P_{cf} 由智能电表控制, 其表达式为

$$P_{cf} = \frac{W_2}{(21-t_r)} \quad (10)$$

当谷时段开始时进行充电即可, 其充电功率 P_{c2} 和式(10)相同。

对于 1)和 2)所述情况, 值得注意的是, 在计算临界剩余电量 SOC_2 时所使用的充电功率 P_c 为电动汽车在慢充桩上的额定功率, 即临界剩余电量 SOC_2 是为最大程度满足电动汽车用户下次出行需求而设计的。因此在情况 1)发生时, 存在 $SOC_2 < 0$ 的情况, 这表明电动汽车在放电阶段可将电量放至 0。此时在谷时段充电时间 T 内, 充电功率 P_{c1} 的表达式为

$$P_{c1} = \frac{LW_{100}}{100T} \quad (11)$$

此时 $T = T_{\text{谷}}$, 且有如下推导过程:

$$P_{c1} = \frac{LW_{100}}{100T_{\text{谷}}} \leq \left(\frac{LW_{100} - SOC_2 \cdot P_0}{100 T_{\text{谷}}} \right) = P_c \quad (12)$$

由式(12)可知, 在上述情况 1)中, 充电功率 P_{c1} 有可能小于额定充电功率 P_c 。同时显而易见, 上述情况 2)中, 充电功率 P_{c2} 等于充电功率 P_c 。

3.2 针对谷时返回人群的有序充放电策略

对于谷时段内返程的电动汽车用户, 策略是: 在时间 T 内直接充电, 其充电功率为

$$P_{c3} = \frac{LW_{100} - SOC_1 \cdot P_0}{T} \quad (13)$$

以上整个策略过程表明, P_{c1} 和 P_{c2} 均不会超过额定充电功率 P_c ; 但 P_{cf} 和 P_{c3} 的值不能确定。因此, 在实际的操作中, 需要加入对各充放电的值的判断, 避免其超过额定充电功率 P_c 。

3.3 有序充放电策略的流程图

根据 3.1 节和 3.2 节两节, 详细的策略如图 4 所示。

3.4 住宅区内电动汽车有序充放电策略的实施方法

为确保文中有序充放电策略在住宅区中的推广和顺利实施, 提出相应的住宅区接线如图 5 所示。

1) 用户住宅与充电桩处安装的智能模块为低压载波通信模块和具有测量功能的智能电表。其中对于同一用户, 低压载波通信模块可完成住宅处和

电动汽车处智能电表用电信息的传递。

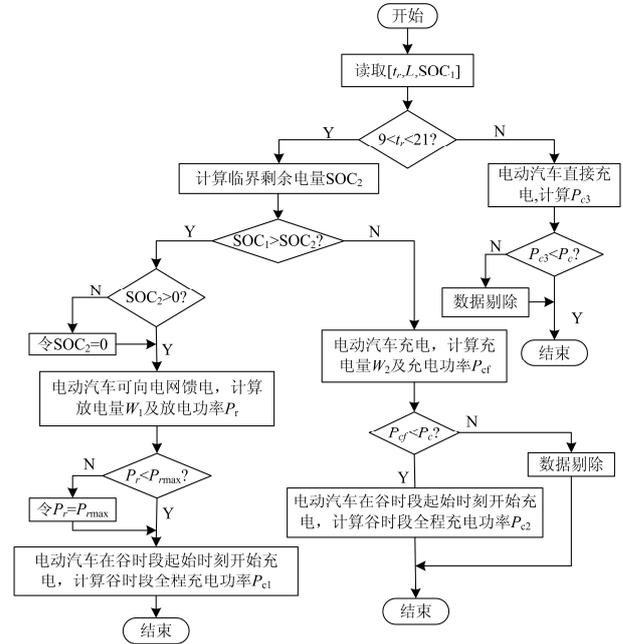


图 4 功率限制电动汽车充放电策略流程图

Fig. 4 Flow chart of charging and discharging strategy for electric vehicle with power limitation

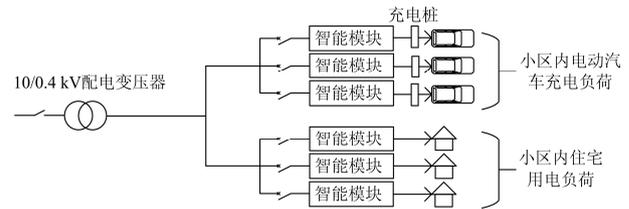


图 5 住宅区接线示意图

Fig. 5 Circuit schematic in residential area

2) 充电桩具有对电池电量、返回时间和离开时间等信息的读取功能; 具有根据设计的策略对预计充电时间和是否满足充电条件与放电条件等信息的判断功能; 同时结合文献[22]中 V2G 技术具有在一定范围内根据需要调整充放电功率的功能。

3.5 基于蒙特卡洛的仿真分析方法

根据本文提出的居民电动汽车有序充放电策略, 进行蒙特卡洛仿真^[23], 仿真步骤如下所述。

步骤一: 确定住宅区内电动汽车数量 N ; 并将一天以每 5 min 为时间间隔分为 288 个时间段。

步骤二: 根据式(3), 通过蒙特卡洛法, 生成每辆车的返回时间 t_r , 并统计各时间段返回的用户数目。

步骤三: 根据式(5)和式(4), 通过蒙特卡洛法, 生成每辆车当前的剩余电量 SOC_1 和下次出行的行驶里程 L 。

步骤四: 根据流程图中的功率限制电动汽车充

放电策略, 为每辆车生成充电指令。

步骤五: 统计分析 N 辆车在 288 个时间段对应的充放电功率, 将其与对应的生活用电功率相加, 可绘制完整的该住宅区日负荷曲线。

4 仿真算例

4.1 参数设置

本文以我国某地一住宅区为例, 根据前文所述模型, 使用蒙特卡洛法分别进行时序仿真, 其中参数初值的设置见表 1。

表 1 参数初值表

Table 1 Initial values of the parameters	
参数	初值
百公里耗电量 W_{100}	15 kWh
额定充电功率 P_c	2 kW
电动汽车数量 N	300 辆
单台电动汽车容量 P_0	40 kWh
配电设施容量数据 S	3 150 kW

除了观察日负荷曲线和对比曲线对应的数据以外, 将峰谷差与峰谷差率作为评判标准之一, 同时考虑配电设施容量, 对仿真结果进行对比。

4.2 仿真结果

将本文提出的包含功率限制的电动汽车有序充放电策略应用至该住宅区后的仿真结果如图 6 所示, 电动汽车负荷曲线分别在峰时与谷时起始时小幅上升与下降, 曲线其余部分的负荷变化较为平稳; 以基础负荷为参照, 可以看出由于在谷时段较低负荷时段内仍有大量的电动汽车用户进行充电, 叠加负荷曲线在该时段内有小幅上升; 由于放电行为, 叠加负荷曲线在峰时段基本与原来持平并有小幅下降; 由于充电功率受到限制, 并没有像图 1 中正序充电策略那样, 因大量电动汽车的接入, 出现新的“高峰”。

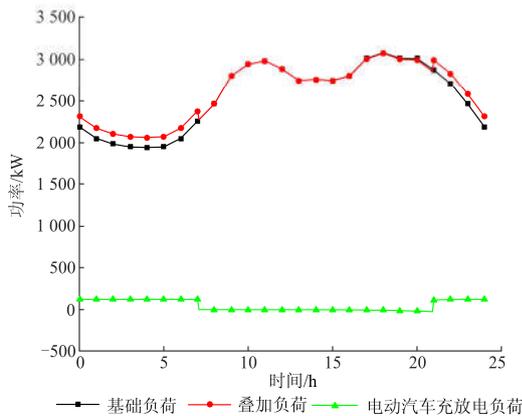


图 6 本文所述有序充放电策略控制下的住宅区负荷曲线
Fig. 6 Load curve of residential area in the strategy as described herein

图 7 为不同充电方式下的直观对比。通过对比分析可知, 以基础负荷对应的曲线为参照, 无序充电方式拥有最高的峰值, 其在原来的峰值基础上峰上加峰, 将进一步地逼近供电容量上限; 正序充电方式下虽未在原有峰值的基础上增加新的负荷功率, 但在谷时段开始时, 有一明显的功率增加, 该增加的功率幅值受接入的电动汽车数量的影响很大, 故当接入的电动汽车数量达到一定值时, 该跃变的功率将可能成为“新峰值”。本文提出的充放电策略控制下, 受充电功率限制的影响, 负荷曲线变得更加平缓且填谷能力远远强于其他的充电方式。

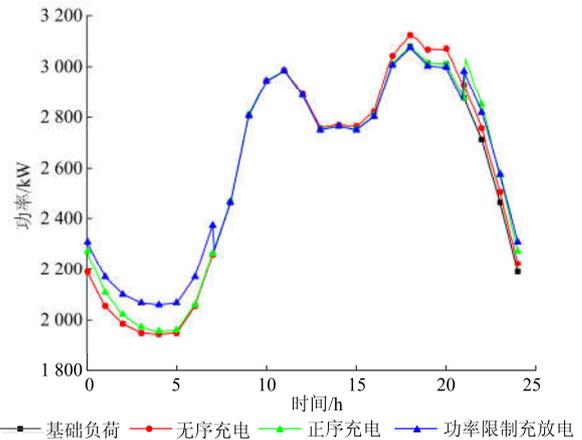


图 7 各充放电方式下叠加负荷曲线对比图

Fig. 7 Comparison of total load curves in different strategies

各充放电方式下电动汽车负荷曲线对比仿真结果如图 8 所示。以无序充电方式的负荷曲线为参照, 正序充电方式的负荷曲线虽然在峰谷时段有相应的调峰填谷的行为, 但是在谷时段开始时负荷直线上升的数值大于另两种方式, 负荷变动大易对配电网造成冲击。本文提出的充放电策略, 虽然在谷

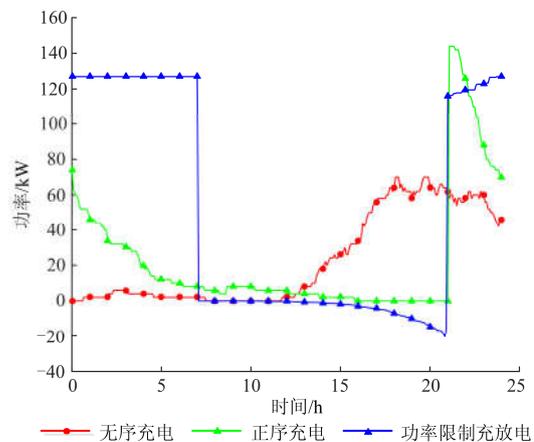


图 8 各充放电方式下电动汽车负荷曲线对比图

Fig. 8 Comparison of EVs' load curve in different strategies

时段开始时有一定的上升，但幅度远不如正序充电方式，且其值虽然超过了无序充电方式，但其负荷上升期也避开了峰时段峰值，避免了峰上加峰，同时该策略在谷时段进行了放电，起到了填谷的作用。

4.3 各方式下电动汽车接纳能力的仿真验证

随着电动汽车数量的增加，在不改变该小区的配电设施容量的前提下，负荷的总叠加曲线势必会在某一电动汽车接入数量时，向上跨越供电容量限值。本节通过对比电动汽车增加前后各充电方式对应的仿真结果，分析各充电方式下对电动汽车能力的强弱，进而分析其在峰谷分时电价背景下是否适用，进一步证明本文所提策略的实用性。

无序充电方式下不同接入规模对应的负荷曲线如图 9 所示。峰时段峰值明显增加，谷时段各数值变化不明显，峰谷差持续增大。当车辆增至 300 辆时，叠加负荷峰值达到了供电容量限值。同时随着电动汽车数量的持续增加，峰值超越供电容量相关数据的时段会越来越长，在车辆增加至 600 辆时，该时段将达到 2.5 h。以上分析证明，采用无序充电的方式对电动汽车的接纳能力较弱，并且闲置谷时电能，峰时负荷水平随车辆的增多不断提高，不仅浪费了电能，还危及配电网运行。

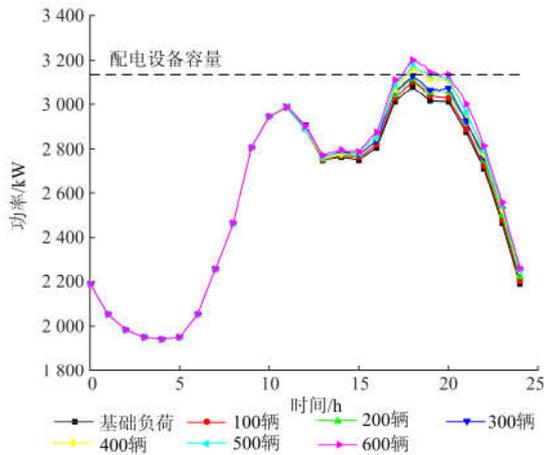


图 9 无序充电方式下的住宅区负荷曲线

Fig. 9 Load curve of residential area in normal charging way

正序充电方式下的住宅区负荷仿真结果如图 10 所示。当接入的电动汽车数量超过 500 辆时，总负荷功率曲线向上跨越了供电容量上限。随着电动汽车的接入不断增多，该充电方式下的总负荷曲线超越供电容量上限的时段不断变大，但始终小于无序充电方式下对应时段。当电动汽车接入量达到 600 辆时，超越时段达到了 0.6 h，因此，该充电方式下该小区对电动汽车的接纳能力强于无序充电。

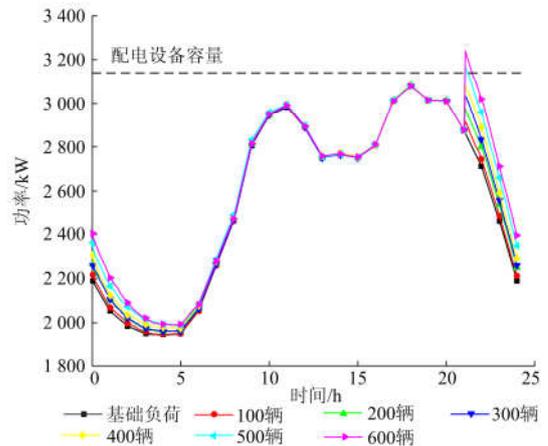


图 10 正序充电方式下的住宅区负荷曲线

Fig. 10 Load curve of residential area under the positive charging strategy

包含功率限制的有序充放电方式的仿真结果如图 11 所示。随着电动汽车的数量增加，不仅没有峰上加峰，并且在谷时段开始时，也没有出现超越峰时段峰值的“新高峰”。当接入的电动汽车量数从 100 辆增加至 600 辆时，谷时段开始时的总负荷功率曲线仅和峰时段的峰值持平，且始终没有到达供电容量限值。因此该充放电方式有优秀的电动汽车接纳能力。同时，随着接入车辆数的增加，总负荷曲线变得更加平滑，填谷能力也在明显的变强。

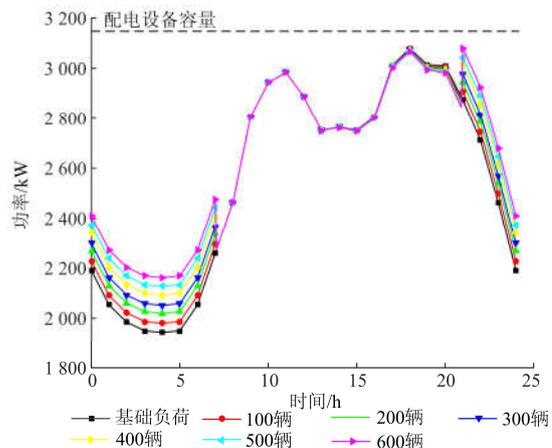


图 11 采用功率限制的有序充放电方式下的住宅区负荷曲线

Fig. 11 Load curve of residential area in the charging and discharging strategy including the power limitation

随着电动汽车数量的增加，在无序充电方式下，峰谷差率在不断地增大；在正序充电方式下，峰谷差率在不断地减小；在电动汽车接入为 500 辆时峰谷差率最小，随后增大。在本文提出的功率限制的有序充放电方式下，其峰谷差率在不断的降低，具有很好的削峰填谷的作用。表 2 给出了不同情形下

的具体数据。以上证明本文提出的充放电策略优于传统的充电方式。

表 2 不同情形下的仿真数据表

Table 2 Simulation data in different cases

电动汽车数量/辆	100	200	300	400	500	600
基础负荷的峰谷差率/%	36.88	36.88	36.88	36.88	36.88	36.88
无序充电方式下的峰谷差率/%	37.41	37.61	37.89	38.44	38.91	39.25
正序充电方式下的峰谷差率/%	36.83	36.45	36.30	35.84	37.06	38.48
功率限制充放电方式下的峰谷差率/%	34.09	32.63	31.52	30.67	30.07	29.81

5 结论

以峰谷分时电价为背景, 经过分析, 随着居民区的电动汽车数量的增加, 传统的电动汽车充放电方式存在“峰上加峰”和“新高峰”问题。为此本文提出一种包含功率限制的电动汽车有序充电策略, 在限制充电功率的同时电动汽车还可向电网馈电。根据算例, 本文提出的电动汽车充放电策略不仅可以充分利用峰谷分时电价制度, 起到很好的削峰填谷的作用, 也使居民区在原有供电容量下拥有优秀的电动汽车接纳能力。

参考文献

- [1] 杨茜, 邓建慎, 李洪峰, 等. 电动汽车公共服务与互动平台设计研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 137-144.
YANG Xi, DENG Jianshen, LI Hongfeng, et al. Design and research on public service and interactive platform in electric vehicle[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(10): 137-144.
- [2] 曾正, 赵荣祥, 杨欢, 等. 电动汽车高渗透率的应对策略及换电站的最优规划[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(9): 7-13.
ZENG Zheng, ZHAO Rongxiang, YANG Huan, et al. Responsive schemes to high penetration of electric vehicles and optimal planning of battery swap stations[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(9): 7-13.
- [3] 党杰, 汤奕, 宁佳, 等. 基于用户意愿和出行规律的电动汽车充电负荷分配策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 8-15.
DANG Jie, TANG Yi, NING Jia, et al. A strategy for distribution of electric vehicles charging load based on user intention and trip rule[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 8-15.
- [4] 唐开宇, 殷少奇. 慢充与快充模式下电动汽车负荷预

- 测及充电设施配比度分析[J]. 智慧电力, 2017, 45(8): 106-110.
TANG Kaiyu, YIN Shaoqi. Electric vehicle charging load forecasting and configuration ratio analysis under slow and fast charging mode[J]. Smart Power, 2017, 45(8): 106-110.
- [5] 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.
GAO Ciwei, ZHANG Liang. A survey of influence of electric vehicle charging on power grid[J]. Power System Technology, 2011, 35(2): 127-131.
- [6] 陈芳, 王艳, 尹自力, 等. 电动汽车多因素负荷对湖南某地区电网的影响研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(2): 40-44.
CHEN Fang, WANG Yan, YIN Zili, et al. Study on influence of electric vehicle multi-factor load on regional power grid in Hunan province[J]. Smart Power, 2018, 46(2): 40-44.
- [7] 徐智威, 胡泽春, 宋永华, 等. 充电站内电动汽车有序充电策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(11): 38-43.
XU Zhiwei, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Coordinated charging of plug-in electric vehicles in charging stations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11): 38-43.
- [8] 张良, 严正, 冯冬涵, 等. 采用两阶段优化模型的电动汽车充电站内有序充电策略[J]. 电网技术, 2014, 38(4): 967-973.
ZHANG Liang, YAN Zheng, FENG Donghan, et al. Two-stage optimization model based coordinated charging for EV charging station[J]. Power System Technology, 2014, 38(4): 967-973.
- [9] 张秀钊, 陈姝敏, 王志敏, 等. 城市快速路口充电站多目标规划[J]. 广东电力, 2018, 31(4): 79-83.
ZHANG Xiuzhao, CHEN Shumin, WANG Zhimin, et al. Multi-objective planning for charging station at city express way crossing[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(4): 79-83.
- [10] 徐浩, 夏鑫珏, 李辉, 等. 计及充电请求预测补偿的电动汽车有序充电策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(24): 74-81.
XU Hao, XIA Xinjue, LI Hui, et al. An ordered charging strategy for electric vehicles accounting the compensation of predicted charging requests[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(24): 74-81.
- [11] 葛少云, 黄镠, 刘洪. 电动汽车有序充电的峰谷电价时段优化[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(10): 1-5.
GE Shaoyun, HUANG Liu, LIU Hong. Optimization of peak-valley tou power price time-period in ordered

- charging mode of electric vehicle[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(10): 1-5.
- [12] 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.
XUE Fei, LEI Xianzhang, ZHANG Yebiao, et al. A brand-new approach of connecting electrical vehicles with smart grid from vehicle-to-grid mode to battery-to-grid mode[J]. Power System Technology, 2012, 36(2): 29-34.
- [13] 项顶, 宋永华, 胡泽春, 等. 电动汽车参与 V2G 的最优峰谷电价研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 15-25.
XIANG Ding, SONG Yonghua, HU Zechun, et al. Research on optimal time of use price for electric vehicle participating V2G[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 15-25.
- [14] 王博, 艾欣. 考虑 V2G 用户响应度的峰谷电价时段优化有序充电[J]. 现代电力, 2016, 33(2): 39-44.
WANG Bo, AI Xin. Coordinated charging of peak-valley time-period optimization by considering V2G user reactivity[J]. Modern Electric Power, 2016, 33(2): 39-44.
- [15] 黄海涛, 吴洁晶, 顾丹珍, 等. 计及负荷率分档的峰谷分时电价定价模型[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14): 122-129.
HUANG Haitao, WU Jiejing, GU Danzhen, et al. Pricing model of time-of-use electricity tariff considering customers classified by load factor[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(14): 122-129.
- [16] 王建. 电动汽车充电对电网的影响及有序充电研究[D]. 济南: 山东大学, 2013.
WANG Jian. Studies on the impacts of electric vehicles charging on the power system and coordinated charging[D]. Jinan: Shandong University, 2013.
- [17] 苏海锋, 梁志瑞. 基于峰谷电价的家用电动汽车居民小区有序充电控制方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(6): 17-22.
SU Haifeng, LIANG Zhirui. Orderly charging control based on peak-valley electricity tariffs for household electric vehicles of residential quarter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(6): 17-22.
- [18] 王汉华, 陈永进. 电动汽车充电设施接入配电网的最优布点规划[J]. 广东电力, 2018, 31(4): 72-78.
WANG Hanhua, CHEN Yongjin. Optimal station planning for electric vehicle charging facilities accessing to distribution network[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(4): 72-78.
- [19] VYAS A, SANTINI D. Use of national surveys for estimating 'full' PHEV potential for oil use reduction [EB/OL]. [2008-07-21]. <http://www.transportation.anl.gov/pdfs/HV/525.pdf>. 2008.
- [20] 郭联哲, 谭忠富, 李晓军. 基于用户响应下的分时电价优化设计模型与方法[J]. 电网技术, 2006, 30(5): 24-28.
GUO Lianzhe, TAN Zhongfu, LI Xiaojun. Demand response based model and method for optimal design of time-of-use electricity price[J]. Power System Technology, 2006, 30(5): 24-28.
- [21] 陶顺, 肖湘宁, 温剑锋, 等. 电动汽车分散充电设施配比度分析与计算方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 11-19.
TAO Shun, XIAO Xiangning, WEN Jianfeng, et al. Configuration ratio for distributed electrical vehicle charging infrastructures[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 11-19.
- [22] 刘晓飞, 张千帆, 崔淑梅. 电动汽车 V2G 技术综述[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 121-127.
LIU Xiaofei, ZHANG Qianfan, CUI Shumei. Review of electric vehicle V2G technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 121-127.
- [23] 孙近文, 万云飞, 郑培文, 等. 基于需求侧管理的电动汽车有序充放电策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 64-69.
SUN Jinwen, WAN Yunfei, ZHENG Peiwen, et al. Coordinated charging and discharging strategy for electric vehicles based on demand side management[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 64-69.

收稿日期: 2017-07-21; 修回日期: 2017-12-11

作者简介:

严俊(1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为配电网规划; E-mail: 594764469@qq.com

严凤(1965—), 女, 博士, 硕导, 研究方向配电网规划。

(编辑 周金梅)