

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190298

住宅小区电动汽车有序充电潜力评估

陈旭¹, 杨柳², 杨振刚¹, 何奉禄³, 晏寒婷³

(1. 中国南方电网有限责任公司, 广东 广州 510530; 2. 广东电力交易中心有限责任公司, 广东 广州 510000;
3. 广州市奔流电力科技有限公司, 广东 广州 510670)

摘要: 电动汽车的充电管理方式影响充电设施配电容量的规划设计, 对住宅小区电动汽车进行有序充电, 可实现削峰填谷, 提高配变利用率, 增加充电设施接入容量。结合住宅小区住户充电行为习惯, 建立住宅小区充电负荷概率模型, 并提出充电负荷同时率和叠加率两个关键参数表征充电负荷变化特性。在此基础上, 建立电动汽车充电负荷与居民用电负荷规划计算模型, 并通过数学解析法得出配变负载率与住宅小区电动汽车最大渗透率之间的关系, 对住宅小区电动汽车有序充电潜力进行定量评估。该研究可为住宅小区充电负荷精益管理、充电设施配电容量合理配置提供科学参考。

关键词: 配变重载; 电动汽车; 有序充电; 潜力评估

Assessment of orderly charging potential of electric vehicles in residential areas

CHEN Xu¹, YANG Liu², YANG Zhengang¹, HE Fenglu³, YAN Hanting³

(1. China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510530, China; 2. Guangdong Power Trading Center Co., Ltd., Guangzhou 510000, China; 3. Guangzhou Power Technology Co., Ltd., Guangzhou 510670, China)

Abstract: The charging management mode of electric vehicles affects the planning and design of the power distribution capacity of charging facilities. Orderly charging of electric vehicles in residential areas can achieve peak load shifting, improve the utilization rate of distribution transformer and increase access capacity of charging facilities. In this paper, a probability model of charging load in residential area is established based on the charging behavior of residents, and two key parameters of charging load, simultaneous rate and stack rate, are proposed to characterize the changing characteristics of charging load. Furthermore, the planning models of the electric vehicle charging load and residential electricity load are established, and then the relationship between the transformer load rate and the maximum permeability of electric vehicles in residential areas is obtained through mathematical analysis to quantitatively evaluate the potential of orderly charging of electric vehicles in residential areas. This paper can provide scientific reference for lean management of charging load and reasonable configuration of distribution capacity of charging facilities in residential areas.

This work is supported by Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (No. ZBKJXM 20160003).

Key words: transformer overload; electric vehicle; orderly charging; potential assessment

0 引言

电动汽车(Electric Vehicle, EV)是交通运输领域降低能源消耗, 进行环境保护的一大变革, 电动汽车的推广使用将推动能源的清洁利用, 实现可持续发展^[1-2]。为促进电动汽车的发展, 2015年国务院

印发《关于加快电动汽车充电基础设施建设的指导意见》(国办发[2015]73号)要求加大充电设施建设力度, 解决电动汽车充电难题, 对新建住宅小区配建停车位应100%建设充电设施或预留建设安装条件^[3]。在此背景下, 各级政府纷纷出台相关政策, 为电动汽车的发展营造良好环境^[4]。

随着电动汽车规模化发展, 大量电动汽车接入电网, 但现有配电网, 特别在密集城区, 难以支撑如此大规模充电桩同时并网运行, 相应的升级扩容

基金项目: 中国南方电网有限责任公司科技项目资助(ZBKJXM 20160003)

难度大且投资巨大。此外,电动汽车充电具有间歇性和不规律性,如不加以有效控制,突发且集中的充电负荷和电网常规用电高峰重叠,易引起电压、频率波动等问题^[5-7],严重时可能造成大面积停电故障。针对上述问题,相关专家学者对电动汽车有序充电展开了研究。文献[8-11]表明通过协调控制住宅小区配变侧充电负荷可缓解配变过载,实现削峰填谷。文献[12]通过校正充电负荷需求误差对有序充电策略进行优化。文献[13]以均衡利用充电设施为目的对车主充电路径进行优化。文献[14]以负荷方差最小为目标,设置充电功率约束,在配变不过载的情况下实现充电负荷削峰填谷的作用。文献[15]将配变剩余容量进行网格划分,以负荷波动最小为目标将充电负荷进行优化分配。文献[16]从配变增容及配网扩展层面分析了有序充电带来的经济效益。文献[17]通过分层控制架构,对电动汽车进行不同时间尺度的有序充电,降低了用户充电费用,优化了系统负荷曲线。文献[18]以住宅小区为研究对象,评估了无序充电方式下,住宅小区承载电动汽车充电负荷的能力。文献[19]将电动汽车有序充电与风光储微网能量管理相结合,提高了电动汽车充电设施的供电可靠性。

综上所述,目前对电动汽车有序充电的研究多集中在有序充电策略及对电网的影响方面,鲜有文献对不同充电管理方式下的充电负荷特征建立评价体系,为充电设施容量配置提供科学指引。

在此背景下,本文提出充电负荷同时率和叠加率两个关键参数表征充电负荷变化特性。在此基础上,建立电动汽车充电负荷以及居民用电负荷规划计算模型,并通过数学解析法得出配变负载率与住宅小区电动汽车最大渗透率之间的关系,对住宅小区电动汽车有序充电潜力进行定量评估,为住宅小区充电负荷精益管理,充电设施配电容量合理配置提供科学参考。

1 评估思路

用户侧住宅小区配电网主要是 10 kV 及以下电压等级低压配电网,网络拓扑结构简单灵活,接线形式多为放射式^[20],本文选定的居民小区配电网拓扑结构如图 1 所示,各放射式馈线通过配电变压器接入电动汽车充电负荷和居民小区用电负荷。影响充电设施接入容量的瓶颈在于配变容量,而配变容量的大小和小区功能定位,规模大小,经济发展状况相关,所以不同小区可接入的充电设施容量不同,需根据电动汽车充电负荷特性以及用户负荷的变化情况,综合考量确定充电设施可接入的最大容量。

相比无序充电,有序充电可进一步缓解无序充电带来的配变过载及增容,增加配变承载电动汽车的能力。以图 1 所示的配网结构为研究对象,图 2 给出了本文有序充电潜力评估流程体系,通过有序充电潜力评估可进一步明确有序充电背景下,居民小区承载电动汽车的能力。

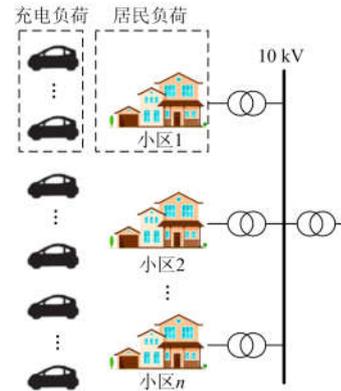


图 1 住宅小区配电网拓扑结构

Fig. 1 Topology of residential distribution network

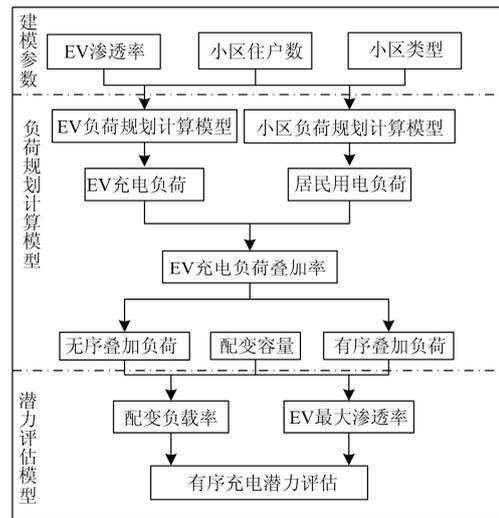


图 2 有序充电潜力评估流程体系

Fig. 2 Assessment process for the potential of orderly charging

居民小区电动汽车有序充电潜力评估流程体系主要分为三个模块。首先进行居民小区配电数据收集,包括居民小区住户数,小区功能定位等,根据住宅小区用电负荷规划计算模型确定小区用电负荷并选择合适的变压器容量。第二个模块是根据居民小区用车充电习惯建立充电负荷概率模型,并结合用户负荷变化特性提取充电负荷同时率和叠加率两个关键参数,根据电动汽车充电负荷同时率及叠加率,可以计算得到电动汽车充电负荷峰值以及与居民负荷叠加后的总负荷峰值大小。第三个模块是有

序充电潜力评估模块, 根据无序及有序充电叠加负荷峰值及配变容量设置情况, 可以得出不同充电管理模式下电动汽车最大渗透率, 通过对比无序与有序充电方式下电动汽车最大渗透率大小即可得出有序充电潜力值。

2 有序充电协议

针对有序充电, 不少专家学者对其展开研究并提出有序充电策略, 但限于电动汽车的发展水平, 目前尚未有采用有序充电策略的工程应用出现, 多采用峰谷电价对用户充电行为进行引导。本节在峰谷电价基础上, 制定以下有序充电协议, 进行有序充电潜力评估。

1) 电动汽车充电用户, 可选择立即充和有序充两种模式。

2) 对选择有序充的用户, 起始充电时刻 t_s 的选择由式(1)决定^[21]。

$$t_s = \begin{cases} t_1 + \ell(t_2 - t_c), & 0 \leq t_c \leq \Delta t \\ t_1, & \text{else} \end{cases} \quad (1)$$

式中: t_1 、 t_2 为用电低谷时段的起止时刻; $\Delta t = t_2 - t_1$ 为用电低谷时段长度; t_c 为充电持续时间; ℓ 为[0,1]区间上的一个随机数。

3 电动汽车充电负荷概率模型

电动汽车充电负荷时空随机性强, 精准建模难度较大, 针对特定场景, 常结合用户充电行为习惯进行概率建模。表征住宅小区住户出行行为习惯的相关参数, 如返回时刻 t 、日行驶里程 d , 沿用 2009 年全美家庭出行调查(NHTS)中的结果, 其概率密度模型分别如式(2)和式(3)所示^[22]。

$$f_s(t) = \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t - \mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right] \quad (2)$$

式中: $\mu_s = 18.3$; $\sigma_s = 0.5$ 。

$$f_d(d) = \frac{1}{d\sigma_d \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln d - \mu_d)^2}{2\sigma_d^2}\right] \quad (3)$$

式中, $\mu_d = 3.2$; $\sigma_d = 0.88$ 。

为便于对充电负荷建模计算, 本文做出以下假设:

- 1) 住户返回小区后立即为电动汽车充电;
- 2) 用户起始充电时刻概率分布和电动汽车行驶里程概率分布相互独立;
- 3) 小区充电设施配置与电动汽车数量相匹配即一车一桩, 不存在排队充电。

基于上述假设, 根据充电开始时刻以及日行驶

里程概率分布模型, 通过 Monte Carlo 模拟抽取 n 辆电动汽车充电行为数据。通过式(4)可模拟出有序充电协议下, 住宅小区不同时刻电动汽车充电负荷大小。

$$\begin{cases} P_t^{\text{ev}} = \sum_{i=1}^n \tau_{i,t}^{\text{ev}} P^{\text{ev}1} \\ \tau_{i,t}^{\text{ev}} = \begin{cases} 0, & \{t \notin [t_{i,s}, t_{i,s} + \phi_i^{\text{ev}}]\} \\ 1, & \{t \in [t_{i,s}, t_{i,s} + \phi_i^{\text{ev}}]\} \end{cases} \\ \phi_i^{\text{ev}} = \frac{\kappa_i^{\text{ev}} \pi_i^{\text{ev}}}{100 P^{\text{ev}1}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: P_t^{ev} 为 t 时刻充电负荷; $\tau_{i,t}^{\text{ev}}$ 为 t 时刻电动汽车 i 充电状态; $t_{i,s}$ 为电动汽车 i 起始充电时刻; ϕ_i^{ev} 为电动汽车 i 充电时长; κ_i^{ev} 为电动汽车 i 日行驶里程(km); π_i^{ev} 为电动汽车 i 百公里耗电量(kWh); $P^{\text{ev}1}$ 为单量电动汽车额定充电功率(kW)。

4 电动汽车充电负荷特征参数

通过电动汽车充电负荷概率模型, 可以模拟出充电负荷时序变化特性, 这种宏观的变化特性可以展示出充电负荷随时间的变化趋势, 但不便于为充电设施配电容量提供指引。为此, 本文在电动汽车充电负荷概率模型的基础上提取充电负荷同时率, 并结合用户负荷变化情况提取充电负荷叠加率两个关键参数, 用于充电设施配电指引, 有序充电潜力评估建模。

4.1 电动汽车充电负荷同时率

对于电动汽车充电负荷的研究, 除了其随时间的分布之外, 更重要的一点是表征充电负荷峰值的大小及其与电动汽车规模之间的关系。充电负荷峰值不是所有电动汽车充电功率的简单叠加。为此, 本文定义小区电动汽车充电负荷同时率 γ^{ev} 为

$$\gamma^{\text{ev}} = \frac{\text{Max}_{t=1, \dots, 24} (P^{\text{ev}}(t))}{P^{\text{ev}1} N^{\text{ev}}} \quad (5)$$

式中: $P^{\text{ev}}(t)$ 为电动汽车 t 时刻总充电负荷(kW); N^{ev} 为小区电动汽车保有量(辆)。

4.2 电动汽车充电负荷叠加率

电动汽车与电网的交互, 最直观的特征是充电负荷与电网基础负荷的叠加。为表征电动汽车充电负荷与电网基础负荷的叠加程度, 本文定义小区充电负荷叠加率 β^{ev} 为

$$\beta^{\text{ev}} = \frac{\text{Max}_{t=1, \dots, 24} P(t)}{\text{Max}_{t=1, \dots, 24} P^{\text{ev}}(t) + \text{Max}_{t=1, \dots, 24} P^{\text{load}}(t)} \quad (6)$$

式中: $P(t)$ 为 t 时刻小区总负荷(kW); $P^{\text{load}}(t)$ 为 t 时刻小区基础负荷(kW)。

5 评估模型

5.1 电动汽车充电负荷规划计算模型

明确住宅小区电动汽车保有量,是规划计算电动汽车充电负荷的第一步。为此,结合住宅小区住户数,定义小区电动汽车渗透率 α^{ev} 为

$$\alpha^{\text{ev}} = \frac{N^{\text{ev}}}{N^{\text{R}}} \quad (7)$$

式中, N^{R} 为小区住户数。

结合式(5)和式(7)可得出居民小区电动汽车充电负荷规划计算模型,如式(8)所示。

$$S^{\text{ev}} = \frac{P^{\text{ev1}} \alpha^{\text{ev}} N^{\text{R}} \gamma^{\text{ev}}}{\eta^{\text{ev}}} \quad (8)$$

式中: S^{ev} 为小区电动汽车充电负荷规划容量(kW); η^{ev} 为小区充电设施充电效率。

5.2 住宅小区居民负荷规划计算模型

住宅小区居民用电规划计算负荷与小区住户规模数量,小区功能定位,住户住房面积,经济发展水平等因素密切相关。在规划计算时需综合考量多种因素,根据用户用电习惯规律,对住宅小区用电负荷进行合理规划计算。在住宅小区用电负荷规划计算中,常常提取需用系数与用电同时率两个关键参数来表征用户用电习惯。根据相关电气设计导则^[23-24],住宅小区居民用电负荷规划计算模型为

$$P^{\text{R}} = P^{\text{J}} N^{\text{R}} \xi^{\text{R}} \delta^{\text{R}} \quad (9)$$

式中: P^{R} 为小区居民用电规划计算负荷(kW); P^{J} 为小区单位住户规划负荷(kW/套); ξ^{R} 为小区单位住户规划负荷需用系数; δ^{R} 为小区用电负荷同时率。

根据式(9),结合小区配电规划裕度,负荷功率因数可得到小区配变容量配置模型如式(10)所示。

$$S^{\text{R}} = \frac{P^{\text{R}}}{\varphi^{\text{R}} \cos \phi} \quad (10)$$

式中: S^{R} 为小区变压器规划计算容量(kVA); φ^{R} 为小区配电规划裕度; $\cos \phi$ 为小区负荷功率因数。

考虑到配电变压器生产厂家容量设置的系列性,应按式(11)选择配电变压器额定容量。

$$S^{\text{R}} \leq \sum_m S_m^{\text{U}} \quad (11)$$

式中: S_m^{U} 为小区适合的单台标准配变额定容量; m 为并列运行的配变台数。

5.3 有序充电潜力评估模型

基于电动汽车充电负荷规划计算模型、居民小区基础负荷规划计算模型以及配变容量配置模型,通过电动汽车渗透率,配变负载率两个关键参数,从配变能量管理的角度可建立住宅小区电动汽车有序充电潜力评估模型。式(12)给出了配变容量与系统负载的关系,式(15)给出了配变运行时所能承载的最大电动汽车渗透率 α^{m} 。

$$S^{\text{U}} \cos \phi \geq (\text{Max}_{t=1, \dots, 24} P^{\text{ev}}(t) + \text{Max}_{t=1, \dots, 24} P^{\text{load}}(t)) \beta^{\text{ev}} \quad (12)$$

配变负载率 λ^{R} 是衡量配变利用率的关键参数,如式(13)所示,通过居民负荷负载率参数关系式可以推导出小区住户数与负载率的关系,如式(14)所示。

$$\lambda^{\text{R}} = \frac{P^{\text{R}}}{S^{\text{U}} \cos \phi} \quad (13)$$

$$N^{\text{R}} = \frac{\lambda^{\text{R}} S^{\text{U}} \cos \phi}{P^{\text{J}} \xi^{\text{R}} \delta^{\text{R}}} \quad (14)$$

考虑居民小区电动汽车充电负荷接入配变后,通过式(5)一式(14)可得出电动汽车最大渗透率 α^{m} 与小区配变负载率 λ^{R} 的关系,如式(15)所示。

$$\alpha^{\text{m}} = \frac{(\lambda^{\text{T}} - \lambda^{\text{R}} \beta^{\text{ev}}) P^{\text{J}} \xi^{\text{R}} \delta^{\text{R}} \eta^{\text{ev}}}{P^{\text{ev1}} \lambda^{\text{R}} \gamma^{\text{ev}} \beta^{\text{ev}}} \quad (15)$$

式中: λ^{T} 为配变重载负载率,常取值为 0.8。

通过式(15)可以计算出不同居民负荷负载率下电动汽车最大渗透率 α^{m} ,当电动汽车渗透率超过最大渗透率时,配变将出现重载风险。式(16)给出了有序充电潜力评估模型。

$$\varepsilon = \alpha_{\text{ord}}^{\text{m}} - \alpha_{\text{unord}}^{\text{m}} \quad (16)$$

式中: ε 为有序充电潜力值; $\alpha_{\text{ord}}^{\text{m}}$ 为小区有序充电最大渗透率; $\alpha_{\text{unord}}^{\text{m}}$ 为小区无序充电最大渗透率。

6 仿真算例

6.1 参数设置

本文以拥有 300 套住房的某小区为研究对象,对小区电动汽车有序充电潜力进行评估。该小区居民负荷规划计算模型参数设置为:住户规划负荷为 8 kW/套,居民用电负荷需用系数 0.6,居民用电负荷同时率取 0.45,居民用电负荷功率因数为 0.85,居民用电负荷规划裕度取值为 0.8。通过小区居民负荷规划计算模型可得到该小区居民负荷峰值为 952 kW,选用 S13 型变压器,额定容量为 1 000 kVA。小区电动汽车充电多以慢充为主,本文选取充电功率为 3 kW。电动汽车相关参数,参考 Nissan leaf 车型,电池容量 24 kWh,百公里耗电量为 13.3 kWh,充电设施充电效率设置为 1,即不考虑电能变换损耗^[26]。

6.2 算例分析

根据上节参数设置,假设小区负荷完全释放后用户负荷曲线如图3黑色曲线所示,配变最大负载率为0.56,根据有序充电协议,设置EV渗透率为0.50,90%的用户选择有序充,经Monte Carlo仿真分析,有序充电负荷与无序充电负荷对比情况如图3所示。有序充电负荷峰值为613.71 kW,峰谷差为309.71 kW,无序充电负荷峰值为689.86 kW,峰谷差为463.29 kW。通过图3宏观负荷曲线可明显看出,相比无序充电,有序充电削峰填谷效益显著,可有效缓解配变重载,提高配变利用率。

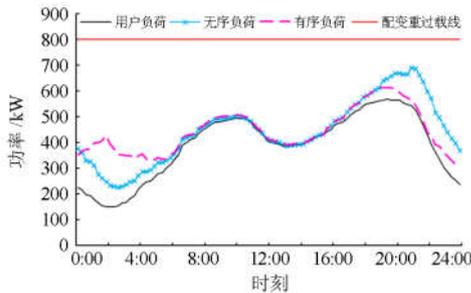


图3 有序充电负荷曲线对比

Fig. 3 Comparison of orderly charging load profile

为进一步挖掘住宅小区充电负荷变化特性,为充电设施配电容量提供指引,本节对不同电动汽车渗透率下的充电负荷同时率特性进行仿真分析研究。考虑到充电负荷同时率和叠加率的波动性和概率性^[25],本文在同一电动汽车渗透率下,通过多次Monte Carlo仿真模拟取平均值的方法确定充电负荷同时率和叠加率。通过多次模拟仿真可以看出, Monte Carlo 计算1 000次后,平均充电负荷同时率和叠加率基本保持不变,因此将仿真次数设置为1 000次。

6.2.1 充电负荷同时率

不同电动汽车渗透率下,充电负荷同时率如图4所示。由图4可以看出,充电负荷同时率大小不一,在一定范围内波动,随着电动汽车渗透率的增加,充电负荷同时率逐渐降低并趋于稳定。另外,有序充电方式下充电负荷同时率明显高于无序充电,无序充电负荷同时率在0.42~0.48波动,有序充电负荷同时率在0.56~0.58波动。

研究表明,电动汽车充电负荷同时率反映了住宅小区用车充电习惯以及不同充电管理方式对充电负荷的聚集特性的影响。通过充电负荷同时率可精细化反映充电负荷峰值与电动汽车规模之间的关系,在本文有序充电协议指引下,充电负荷的聚集性增强。

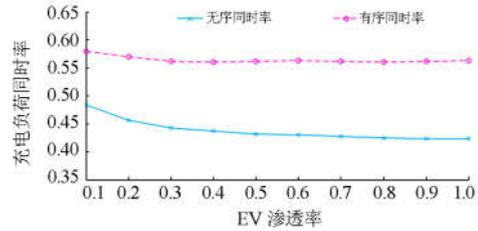


图4 充电负荷同时率

Fig. 4 Simultaneity rate of charging load

6.2.2 充电负荷叠加率

本节通过模拟分析充电负荷叠加率参数在不同电动汽车渗透率下的变化特性来研究充电负荷与居民用户负荷的叠加特性,如图5所示。由图5可以看出,充电负荷叠加率变化特性与充电负荷同时率变化特性相似,随着电动汽车渗透率的增加,充电负荷叠加率逐渐降低并趋于稳定,其中有序充电方式下,随着电动汽车渗透率的增加,充电负荷与居民负荷的叠加率大大降低。另外,有序充电方式下充电负荷叠加率明显低于无序充电,无序充电负荷叠加率在0.92~0.96波动,有序充电负荷叠加率在0.61~0.92波动。

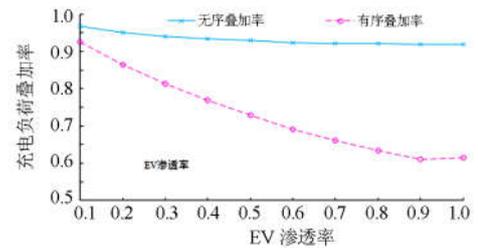


图5 充电负荷叠加率

Fig. 5 Stack rate of charging load

电动汽车充电负荷叠加率反映了居民小区充电负荷对系统负荷峰值的影响。通过充电负荷叠加率可精细化反映充电负荷峰值与居民负荷峰值之间的关系。研究表明,虽然在本文有序充电协议指引下,充电负荷的聚集性增强,但是通过有序充电叠加率可以看出,相比无序充电,充电负荷的聚集不仅没有与用户负荷造成“峰上加峰”的严重后果,反而起到了削峰填谷的作用,改善了系统负荷特性,因此充电负荷叠加率在一定程度上反映了电动汽车有序充电策略削峰填谷的能力,其值越小,代表削峰填谷能力越强。

6.3 有序充电潜力

通过式(15)和式(16),结合本文算例参数设置,可得出在配变负载率为0.56时,有序充电方式下,电动汽车最大渗透率为1,即完全可以满足小区用户充电需求,而无序充电最大渗透率为0.65,即只能

满足 65% 用户的充电需求, 有序充电潜力值为 0.35。

在住宅小区配电网规划时, 不同的配电变压器容量配置方案, 将导致配电变压器运行在不同的负载率水平。为进一步分析不同配变负载率情形下有序充电潜力, 在本文所研究算例基础上, 通过设置不同配变负载率进行有序充电潜力评估, 结果如图 6 所示。

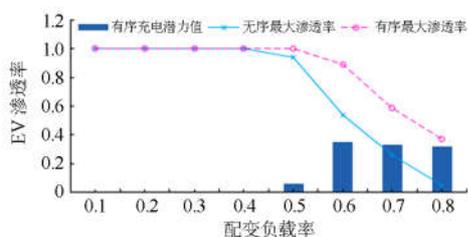


图 6 不同配变负载率下有序充电潜力

Fig. 6 Potential of orderly charging under different transformer load rates

从图 6 可以更明显地看出, 不同配变负载率情况下的有序充电潜力。当小区配变负载率低于 0.5 时, 有序充电与无序充电对小区电动汽车最大渗透率几乎没有影响; 而当负载率高于 0.5 时, 相比无序充电, 有序充电可明显增加小区电动汽车渗透率, 延缓配变扩容。当配变负载率为 0.8 时, 无序充电方式下, 配变能承载的电动汽车渗透率为 0.06, 而有序充电方式下, 配变可以承载的小区电动汽车渗透率为 0.4, 有序充电潜力值为 0.34。研究表明, 对电动汽车进行有序充电改变了充电负荷的变化特性, 随着配变负载率的增加, 住宅小区有序充电潜力显著。

7 结论

本文通过充电负荷同时率和叠加率两个关键参数表征充电负荷变化特性, 并建立住宅小区电动汽车有序充电潜力评估模型, 通过仿真分析可以得出如下结论:

(1) 有序充电背景下, 综合考量充电负荷同时率及与其他负荷的叠加率, 可提高住宅小区配电网承载电动汽车的能力, 增加充电设施接入容量。对电动汽车进行有序充电改变了充电负荷的变化特性, 随着配变负载率的增加, 住宅小区有序充电潜力显著。

(2) 本文所提方法可为住宅小区充电负荷精益管理、充电设施配电容量合理配置提供科学参考。不同住宅小区可根据用户不同的充电行为习惯改进有序充电策略, 进一步挖掘有序充电潜力, 提高配变利用率, 增加充电设施接入容量。

参考文献

- [1] BOULANGER AG, CHU A C, MAXX S, et al. Vehicle electrification: status and issues[J]. Proceeding of the IEEE, 2011, 99(6): 1116-1138.
- [2] 樊扬, 余欣梅, 王路. 南方电网区域发展电动汽车综合效益分析[J]. 南方电网技术, 2011, 5(4): 51-54.
- [3] FAN Yang, YU Xinmei, WANG Lu. Comprehensive benefit analysis of electric vehicle development in China southern power grid region[J]. China Southern Power System Technology, 2011, 5(4): 51-54.
- [4] 国务院. 国务院办公厅关于加快电动汽车充电基础设施建设的指导意见[EB/OL]. [2015-09-29]. http://www.gov.cn/jzhqce/content/2015/10/09/content_10214.htm.
- [5] 广东省人民政府办公厅. 广东省人民政府办公厅关于加快新能源汽车推广应用的实施意见[EB/OL]. [2016-03-28]. http://zwgk.gd.gov.cn/006939748/201604/t20160411_651127.htm.
- [6] FERNANDEZ L P, ROMAN T G, COSSENT R, et al. Assessment of the impact of plug-in electric vehicles on distribution network[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(1): 206-213.
- [7] 杨田, 刘晓明, 吴其. 电动汽车充电站选址对电压稳定影响的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(5): 31-37.
- [8] YANG Tian, LIU Xiaoming, WU Qi. Research on impacts of electric vehicle charging station location on voltage stability[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(5): 31-37.
- [9] 陈丽丹, 张尧. 融合多源信息的电动汽车充电负荷预测及其对配电网的影响[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(12): 1-10.
- [10] CHEN Lidan, ZHANG Yao. Prediction of EV charging load with multi-source information and its impact on distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(12): 1-10.
- [11] GENG B, MILLS J K, SUN D. Two-stage charging strategy for plug-in electric vehicles at the residential transformer level[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(3): 1442-1452.
- [12] RAMOS M E, RAZEGHI G, ZHANG L, et al. Electric vehicle charging algorithms for coordination of the grid and distribution transformer levels[J]. Energy, 2016, 113: 930-942.
- [13] SHOKRZADEH S, RIBBERINK H, RISHMAWI I, et al. A simplified control algorithm for utilities to utilize plug-in electric vehicles to reduce distribution transformer overloading[J]. Energy, 2017, 113:1121-1131.
- [14] MOSES P S, MASOUM M A S, HAJFOROOSH S. Overloading of distribution transformers in smart grid due to uncoordinated charging of plug-In electric vehicles[C]// 2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), January 16-20, 2012, Washington,

- DC, USA: 1-6.
- [12] 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.
- [13] 周天沛, 孙伟. 基于充电设备利用率的电动汽车充电路径多目标优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(4): 115-123.
ZHOU Tianpei, SUN Wei. Multi-objective optimal scheduling of electric vehicles for charging route based on utilization rate of charging device[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(4): 115-123.
- [14] 齐先军, 李冬伟, 纪姝彦. 采用功率限制的住宅区电动汽车有序充电控制策略[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3715-3721.
QI Xianjun, LI Dongwei, JI Shuyan. An orderly charging control strategy for residential EV with power limit[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3715-3721.
- [15] 王姝凝, 杨少兵. 居民小区电动汽车充电负荷有序控制策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(4): 71-77.
WANG Shuning, YANG Shaobing. Orderly control strategy of EV charging load in residential area[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(4): 71-77.
- [16] 王小蕾, 姚伟锋, 文福拴, 等. 电动汽车有序充电管理的综合效益分析[J]. 电力建设, 2015, 36(7): 194-201.
WANG Xiaolei, YAO Weifeng, WEN Fushuan, et al. Comprehensive benefit analysis of orderly charging management of electric vehicles[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(7): 194-201.
- [17] XU Z, SU W, HU Z, et al. A hierarchical framework for coordinated charging of plug-in electric vehicles in China[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 7(1): 428-438.
- [18] 郭毅, 胡泽春, 张洪财, 等. 居民区配电网接纳电动汽车充电能力的统计评估方法[J]. 电网技术, 2015, 39(9): 2458-2464.
GUO Yi, HU Zechun, ZHANG Hongcai, et al. A statistical method to evaluate the capability of residential distribution network for accommodating electric vehicle charging load[J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2458-2464.
- [19] 赵文仓. 风光储微网与充电桩一体化系统管理与能量调度[J]. 新能源汽车供能技术, 2018, 2(4):19-22.
ZHAO Wencang. Integrated system management and energy dispatch of wind and solar storage microgrid and charging pile[J]. Energy Supply Technology for New Energy Vehicles, 2018, 2(4): 19-22.
- [20] 黄裕春, 王宏, 王珂. 考虑电动汽车充电设施接入的居民配电系统供电容量最优规划[J]. 电力建设, 2018, 39(6): 1-6.
HUANG Yuchun, WANG Hong, WANG Ke. Optimal planning of power supply capacity of residential distribution system considering access of charging facilities of electric vehicles[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(6): 1-6.
- [21] 王毅, 王飞宏, 侯兴哲, 等. 住宅区电动汽车充电负荷随机接入控制策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(20): 53-60.
WANG Yi, WANG Feihong, HOU Xingzhe, et al. Random access control strategy of EV charging load in residential area[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(20): 53-60.
- [22] 葛少云, 郭建祎, 刘洪. 计及需求侧响应及区域风光出力的电动汽车有序充电对电网负荷曲线的影响[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1806-1811.
GE Shaoyun, GUO Jianyou, LIU Hong. Considering the influence of demand side response and regional wind and light output on the load curve of electric vehicles[J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1806-1811.
- [23] 中国建筑标准设计研究院.住宅建筑电气设计规范: JGJ 242—2011[S]. 2012.
- [24] 广州供电局有限公司. 广州市配电网设置原则[S]. 2018.
- [25] 杨健维, 苟方杰, 黄宇. 基于不确定性测度的居民小区电动汽车充电分时电价制定策略[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 96-102.
YANG Jianwei, GOU Fangjie, HUANG Yu. Tactics of charging time-sharing tariff for residential electric vehicles based on uncertainty measure[J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 96-102.
- [26] 陈丽丹, 聂涌泉, 钟庆. 基于出行链的电动汽车充电负荷预测模型[J]. 电工技术学报, 2015, 30(4): 216-225.
CHEN Lidian, NIE Yongquan, ZHONG Qing. Electric vehicle charging load forecasting model based on travel chain[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(4): 216-225.

收稿日期: 2019-03-19; 修回日期: 2019-08-25

作者简介:

陈旭(1976—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为电动汽车充电桩、电力系统规划; E-mail: chenxu@csg.cn

杨柳(1980—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电网规划, 电力系统安全经济运行, 电力市场分析; E-mail: yangliu607@sina.com

杨振纲(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为新能源、微电网、智能电网技术. E-mail: yangzg@csg.cn

(编辑 周金梅)