

充电式电动汽车停车场的 V2G 模型及 接入配电网方案优化研究

吕耀棠¹, 管霖², 赵琦², 周保荣³

(1. 中国南方电网电力调度控制中心, 广东 广州 510623; 2. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640;
3. 南方电网科学研究院, 广东 广州 510663)

摘要:从配电网潮流分析的角度出发,建立了基于电价引导原则的车网互联(V2G)功率模型。针对充电式电动汽车停车场负荷接入配电网的馈线和接入点选择问题,以减小馈线网损和日内电压波动为目标,建立了考虑 V2G 行为的接入规划模型。结合实例分析了负荷类型和光伏渗透率对规划方案的影响,算例结果表明电动汽车的 V2G 行为对配电网运行效益有显著影响,且不恰当接入方案下 V2G 行为可能会给配电网带来明显的负面影响。

关键词:配电网规划;电动汽车;V2G;电价;负荷;光伏渗透率

中图分类号:U 469.72;TM 715

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.11.001

0 引言

随着可再生能源发电、分布式储能、插电式电动汽车(PEV)等新能源利用技术的不断发展,未来电网建设将关注智能配电系统,并以发、配、储、用的综合智能调度和管理为目标构建新一代配电系统。大量分布式发电和储能的接入给当前配电网规划和接入方案的选择带来了诸多亟待解决的技术问题。目前,我国城乡分布式光伏电源接入增长快速,含高渗透率光伏的配电网可能面临配电线路峰谷差变大、配电网负载率和设备利用率降低、节点电压日内波动加剧等一系列问题。上述这些问题都使得配电侧对储能配置的需求不断增长,而电动汽车蓄电池恰好为配电网提供了大量分布式的储能容量^[1-2]。随着电动汽车的逐渐普及,充电式电动汽车停车场(EVPP)数量将越来越大。EVPP 本身的布点主要考虑建筑、人流和交通需求^[3]进行规划,当其建设位置容量确定并申请接入电网时,往往存在多条经过周边区域的馈线和接入点可供选择。由于 EVPP 既是大负荷,又是储能型电源,不同的接入方案会对配电网运行的经济性产生显著影响。

对于车网互联(V2G)的研究近年来引起了世界范围的广泛关注。V2G 行为是指电动汽车作为一种与电网相连接的分布式负荷/电源,通过主动充放电参与并支持电网安全和运行优化的行为,其本质是促使接入电网的大量电动汽车储能参与电网的调

控。良好的 V2G 行为可以显著改善电力系统的负荷峰谷分布,延缓电源建设和电网建设投入,缓解电网短时过电流,并改善供电电压水平。目前关于 V2G 行为对配电网的影响有 2 种不同的研究思路。一类是基于电网能直接控制的充放电行为^[4-7],文献[5-6]分别从电网角度、车主收益角度设计了电动汽车的充放电控制策略;文献[7]以抑制电网频率波动为目标进行 V2G 运行策略研究。另一类则侧重电价激励政策来引导用户的 V2G 行为,而不是直接进行控制^[8-9]。

针对电动汽车充电站接入配电网的优化规划方面,一部分研究从投资者的角度出发,围绕配电网投资运行成本最小^[10]、电动汽车充电站综合效益最大^[11]等优化目标选择电动汽车充电站接入配电网的优化方案。也有相关研究从微电网接入要求^[12]、负荷优化控制^[13]等角度出发,优化电动汽车充电站在配电网的接入方案。但现有研究更多关注的是电网整体层面的移峰填谷和调峰调频等需求,较少有直接涉及电动汽车充电站优化接入对配电网网损及电压波动等具体运行指标的影响。

电动汽车的充电需要考虑用户出行需求和习惯,EVPP 的 V2G 行为与电网专设的储能站有显著差别。首先,在相当长的时期内其 V2G 行为难以直接被电网远程控制或集中调度管理,通过电价激励政策间接引导电动汽车用户的主动响应更为可行。其次,引导 V2G 行为的电价政策往往会根据较大范围内的主网调峰需求来确定电价峰谷时段,而由于不同配电馈线用户类型的差异,EVPP 接入的配电馈线负荷与区域总负荷的峰谷时段可能存在显著差异,需要独立分析 V2G 行为对配电网运行的影响。最后,接入充电桩的车辆数量和电池容量、状态都是随时间变化的,具有随机性。

收稿日期:2017-07-13;修回日期:2018-08-14

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(51437006);国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(51761145106)
Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China(51437006) and the Program of National Natural Science Foundation of China on Major International(Regional) Joint Research Project(51761145106)

本文从配电网运行需求出发,建立了 EVPP 的 V2G 行为简化模型。在此基础上,以降低配电馈线运行损耗、减小沿线节点电压波动为优化目标,建立了考虑 V2G 行为的 EVPP 接入配电网的优化规划模型。结合算例系统分析了光伏渗透率、负荷类型对选择接入方案的影响。

1 配电网中 EVPP 的 V2G 行为建模

电动汽车充电桩一般有 2 种充放电模式。一种是以满足用户的紧急交通需求为目标的快充模式,广泛应用于充电站。快充型充电桩一般不参与 V2G 响应。另一种是慢充模式,在普通停车场的充电桩中普遍采用。随着家用和商务型电动汽车的逐步普及,配置大量充电桩的 EVPP 将快速发展,也逐渐成为配电网规划和 V2G 影响分析的关注重点。

电动汽车的 V2G 行为会对高压电网和中低压配电网的运行产生不同的影响。对于高压电网而言,其作用体现在参与电网调峰调频,改变高压电网负荷水平,降低峰谷差,达到减缓高压电网建设投资、减少新能源大量接入后调峰电厂的建设需求的目的。单个充电站个体容量太小,只有许多充电站的整体行为作用才有影响。因此,一般会根据高压电网的调峰需求制定电动汽车充放电的峰谷电价政策,以引导大区域范围内电动汽车的 V2G 行为。但是,对于 EVPP 接入的配电馈线而言,V2G 行为直接改变了馈线负载水平和沿线电压分布,且这种改变对配电馈线运行管理的影响既可能是正面的,也可能是负面的,故在选择 EVPP 的接入方案时需要考虑其 V2G 行为的长期影响。

本文基于电价引导和自主选择原则,建立了适用于配电网分析的 V2G 行为模型。本文建立 V2G 行为模型的原则如下。

a. 政府或电网企业以削峰填谷为目标,根据总负荷的峰/谷/平时段,制定充电桩的充电和放电峰谷电价政策,激励电动汽车车主参与 V2G。

b. 电网调度不能直接控制每辆电动汽车的充放电行为。

c. 电动汽车用户在电动汽车接入充电桩时可在智能充电桩上自主选择是否参与 V2G。一旦选择参与 V2G,由智能充电桩根据充电和放电峰谷电价,按设定规则进行充电或放电。该规则应从用户利益出发,兼顾收益最大化和出行需求。

1.1 EVPP 的最大可响应功率

EVPP 的最大可响应功率计算公式如下:

$$W_{\max}(t) = \rho \varphi(t) N_c w_{c0} \quad (1)$$

其中, $W_{\max}(t)$ 为在 t 时刻 EVPP 参与 V2G 的最大可响应功率; ρ 为用户参与 V2G 的概率,可根据统计数

据测算; N_c 为 EVPP 的充电桩总数; w_{c0} 为单个充电桩典型模式下的充/放电功率; $\varphi(t)$ 为在 t 时刻 EVPP 充电桩的占用率,与 EVPP 的位置有关, EVPP 充电桩的占用率在一天内的变化可以采用类似典型日负荷曲线的方式获得和描述。

文献[14]给出了典型行政办公区与居民区工作日停车场泊位的占用率,如附录中图 A1 所示。可以看出,办公区和居民区的停车场占用率分布具有时间上的互补特性。当停车场内充电桩数远少于泊位数时,充电桩占用率可能始终很高。但随着电动汽车的普及,当充电桩数接近或等于泊位数时,充电桩占用率会出现类似附录中图 A1 的变化规律。

1.2 充电桩参与 V2G 响应的控制规则

对于选择参与 V2G 的电动汽车,其充电桩在 t 时刻的充/放电功率如下:

$$w_c = \begin{cases} -w_{c0} & m_{\text{SOC}} > k_p; t \in \text{峰时段} \\ w_{c0} & m_{\text{SOC}} < k_v; t \in \text{谷时段} \\ w_{c0} & m_{\text{SOC}} < k_f; t \in \text{平时段} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

其中, w_c 为单个充电桩在 t 时刻的输入功率,充电时为正,放电时为负; m_{SOC} 为充电桩上所接电池的荷电状态(SOC),即电动汽车电池的剩余容量与额定电池容量之比; k_p 、 k_f 和 k_v 分别为对应于放电要求的最低荷电水平、平时段充电设定的最高荷电水平、谷时段充电设定的最高荷电水平,一般有 $k_v \geq k_p \geq k_f$ 。根据用户出行需求和一般蓄电池的最大放电深度参数,本文取 k_v 、 k_p 、 k_f 的典型值分别为 1、0.6、0.4。

根据上述规则,参与 V2G 的电动汽车在峰时段不充电,若峰时段的电池容量高于设定水平,则向电网定功率输电以获得高回报;在平时段,若电池容量低于一定水平,则充电到设定 SOC 为止;在谷时段,电池充电至满荷状态为止。

1.3 EVPP 的电功率

在 t 时刻某个充电桩上所接电动汽车的电池 SOC 可视为一个离散随机变量,在 $[0, k_f)$ 、 $[k_f, k_p)$ 、 $[k_p, k_v)$ 、 $[k_v, 1)$ 、 $[1]$ 5 个取值区间内满足已知的概率分布。设在 t 时刻电池 SOC 位于各区间的概率值分别为 $p_1(t)$ 、 $p_2(t)$ 、 $p_3(t)$ 、 $p_4(t)$ 、 $p_5(t)$,且满足 $p_1(t) + p_2(t) + p_3(t) + p_4(t) + p_5(t) = 1$ 。考虑到 EVPP 车辆的流动性,本文中简单地认为每个时段接在充电桩上的所有车辆的 SOC 在统计上具有相对确定的概率分布。

运行模拟中按上述概率分布估计参与 V2G 充电桩中电池处于不同 SOC 的概率。则根据 1.2 节的规则得到 EVPP 在 t 时刻的实际功率平均值 W_t 的计算公式如下:

$$W_r(t) = \begin{cases} -[W_{\max}(t)(1-p_1(t)-p_2(t))+W_{\text{not}}(t)] & t \in \text{峰时段} \\ W_{\max}(t)(1-p_5(t))+W_{\text{not}}(t) & t \in \text{谷时段} \\ W_{\max}(t)p_1(t)+W_{\text{not}}(t) & t \in \text{平时段} \end{cases} \quad (3)$$

其中, $W_{\text{not}}(t)$ 为在 t 时刻用户选择不参与 V2G 的充电桩的充电负荷,默认这类车辆将持续充电到 $m_{\text{SOC}} = 1$, 且 $W_{\text{not}}(t) = W_{\max}(t)(1-\rho)/\rho$ 。

2 配电网中计及 V2G 的 EVPP 优化接入模型

2.1 问题描述

EVPP 本身的选址和充电桩数量主要根据交通、居住点和办公点分布等城市布局和投资分析确定,本文不涉及相关方法的研究。本文关注的是当 EVPP 地理位置和容量确定后,配电网规划中对其接入电网方案选择的问题。

EVPP 接入规划示意图如附录中图 A2 所示, EVPP 普遍位于人流密集区域,街区周边配电馈线密集,可以选择的接入馈线较多。不同的中压馈线的主要用户类型不同,可以是居民、商业和行政办公或是其混合。可行的接入环网点在馈线中的位置也各不相同,如图中 A、B、C 这 3 个接入点。在接入成本相近的情况下,规划方案的选择主要考虑的是 EVPP 接入对配电网运行的影响,其中 V2G 行为的影响不容忽视。

上述 EVPP 接入配电网的优化规划研究问题可描述为:已知某地块待建 EVPP 的充电桩总容量为 P_n ,从该地块临近区域有 m 条中压馈线经过并可提供候选接入点。不同的馈线结构、用户分布、用户类型和光伏电源容量分布已知而且存在差异,要求优化选择 EVPP 的接入方案,使得考虑 V2G 行为后配电线路运行特性最优。

2.2 优化目标函数

V2G 行为是指接入充电桩的电动汽车蓄电池能根据电网需要调整充放电行为,包括:稳态下作为可平移负荷调整充电时间和功率;稳态下在电网峰荷、线路重过载等时段作为电源对电网放电以改善频率或消除局部重过载;当配电网故障隔离引起部分用户与电网失去联系时,协助分布式电源保持孤岛能量平衡和重要用户的供电。相应地,V2G 的价值和作用表现如下。

a. 按需改变配电线路稳态潮流分布,从而降低配电线路最大电流水平,改善沿线电压分布,起到提高配电线路利用率、延缓配电线路扩建投资、调整沿线电压分布、降低配电损耗等作用。

b. 参与电网调频调峰,改变高压电网等效负荷水平,降低峰谷差,达到减缓高压电网建设投资、减少新能源大量接入后对主网动态调频性能的需求的

目的。需要说明的是,对于高压电网而言,电动汽车蓄电池单体容量过小,数量过于庞大,分散性过强,如何促使其协调作用实现对高压电网运行性能的改善是对电网控制管理能力的巨大挑战。

c. 在配电网故障期间作为支撑微电网运行的主电源,实现提高用户供电可靠性的目标。

在 V2G 的上述作用中,第二项调峰调频作用关注的是大量 EVPP 作为一个整体对高压电网有功平衡和频率的影响,其与参与 V2G 的电动汽车总容量有关。第三项则主要取决于 V2G 的孤岛(微电网)控制性能。两者均与 EVPP 在配电网的接入方案关联不强。因此,在 EVPP 接入规划中主要考虑 V2G 的第一项作用。据此本文选择以下 2 个优化规划目标。

目标 1 是配电网全年有功网损最小。规划考虑的是长期效益,因此 EVPP 接入规划的网损目标应包含全年各种运行工况下配电网的年电能损耗总量,需考虑负荷曲线、光伏出力曲线和 EVPP 功率的变化规律及其影响。具体目标函数如下:

$$\min W_{\text{loss}} = \sum_{m=1}^{12} \left[D_m \left(p_m^c \sum_{n=1}^{24} P_{Lm,n}^c + p_m^r \sum_{n=1}^{24} P_{Lm,n}^r \right) \right] \quad (4)$$

其中, W_{loss} 为年功率损耗,单位为 $\text{MW} \cdot \text{h}$; $P_{Lm,n}^c$ 为晴天时第 m 个月任意一天第 n 小时的功率损耗,单位为 MW ; $P_{Lm,n}^r$ 为阴雨天时第 m 个月任意一天第 n 小时的功率损耗,单位为 MW ; p_m^c 为第 m 个月天气是晴天的概率; p_m^r 为第 m 个月天气是阴雨天的概率; D_m 为第 m 个月的天数。式(4)中网损值通过年运行模拟仿真计算得到。

目标 2 是配电网节点电压波动最小。光伏电源和储能有功功率的变化改变了沿线电压分布和电压水平。本文采用如下目标函数描述馈线所有节点综合年平均电压波动率的均值要求。

$$\min f_{\text{av}} = \frac{1}{8760N} \sum_{m=1}^{12} \left[D_m \left(p_m^c \sum_{n=1}^{24} \sum_{i=1}^N |V_{i,m,n}^c - \bar{V}_i| + p_m^r \sum_{n=1}^{24} \sum_{i=1}^N |V_{i,m,n}^r - \bar{V}_i| \right) \right] \quad (5)$$

其中, f_{av} 为配电网所有节点的年平均电压波动率,反映整体电压波动水平, f_{av} 越小说明 EVPP 接入对负荷节点的电压波动改善程度越大, f_{av} 越大说明 EVPP 对负荷节点电压的支撑作用越小; $V_{i,m,n}^c$ 和 $V_{i,m,n}^r$ 分别为晴天和阴雨天状态下第 m 个月任意一天第 n 小时节点 i 的电压; $\bar{V}_i$ 为节点 i 的日平均电压; N 为馈线节点数。

目标函数中各变量各时刻数值通过基于潮流计算的年运行模拟模块求解。年运行模拟作为优化规划的内嵌模块,其任务是生成全年逐小时的负荷功

率、光伏发电功率、EVPP 功率运行状态样本,应用潮流计算得出各样本的网损、节点电压和支路电流。

2.3 光伏发电概率模型

规划关注的是配电网中长期运行性能和效益,光伏功率短时波动引起的运行问题由运行控制解决。因此本文采用文献[15]提出的适用于电网规划的光伏发电日曲线离散概率模型。该模型结合气象领域知识和历史数据分析给出了已知纬度地区在晴天和阴雨天的各天地表太阳辐照度小时均值的时间序列。其中所采用的太阳辐照度的小时均值模型如下:

$$\begin{cases} R_s(\varphi, m, d, h) = H_0(\varphi, m, d) K_l(m, d, h) & \text{晴天} \\ \alpha(m) R_s(\varphi, m, d, h) & \text{阴雨天} \end{cases} \quad (6)$$

其中, $R_s(\varphi, m, d, h)$ 为晴天状况下第 m 个月 d 日 h 处纬度为 φ 的地点地表太阳辐照度小时均值; $\alpha(m)$ 为第 m 个月阴雨天的辐照度衰减系数,且 $0 \leq \alpha(m) < 1$; H_0 为日内地外太阳辐照总量,反映地球公转的影响,其值随着地球环日运转而呈现确定性的时变规律,与地外辐照度基值 I_0 、日偏角 δ 和日升小时角 ω_{sr} 有关; K_l 为地外至地表太阳辐照度衰减系数,取决于地球自转和云层变化,可表述为日出时间 h_{sr} 、日落时间 h_{ss} 、晴天的日照晴空指数 C_s 的函数。每月处于晴天的概率 $p_s(m)$ 可由历史气象数据统计得出,阴雨天状态概率 $p_r(m) = 1 - p_s(m)$ 。上述相关参数均可通过经验公式或气象数据库求得^[15]。具体计算公式如下:

$$H_0 = \frac{24I_0}{\pi} (\cos \varphi \cos \delta \sin \omega_{sr} + \omega_{sr} \sin \varphi \sin \delta) \quad (7)$$

$$K_l = \begin{cases} 0 & h < h_{sr} \\ \frac{C_s}{2} \frac{\pi}{h_{ss} - h_{sr}} \sin \left(\frac{h - h_{sr}}{h_{ss} - h_{sr}} \pi \right) & h_{sr} \leq h \leq h_{ss} \\ 0 & h > h_{ss} \end{cases} \quad (8)$$

根据小时辐照度曲线可由下式计算得到对应的光伏功率曲线。

$$P_{PV} = P_s \frac{R}{1000} [1 + \alpha_T (T - 25)] \quad (9)$$

其中, P_s 为光伏电源在标准太阳辐照度 1000 W/m^2 和 25°C 下的实际功率,与光伏板的布置和安装方式有关; α_T 为光伏电池的功率温度系数; T 为运行环境温度。

2.4 优化约束条件

接入方案必须满足配电网运行的基本潮流约束条件,表示为机会约束形式如下。

节点电压约束^[16]为:

$$P_r \{ V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \} \geq \beta_u \quad i = 1, 2, \dots, N_{\text{bus}} \quad (10)$$

其中, $P_r \{ \cdot \}$ 为 $\{ \cdot \}$ 中事件成立的概率; $V_i^{\max}$ 和 $V_i^{\min}$ 分

别为节点 i 规定电压幅值上限值和下限值; β_u 为电压约束的置信水平; N_{bus} 为配电网节点总数。

支路电流约束^[15]为:

$$P_r \{ I_j \leq I_j^{\max} \} \geq \beta_i \quad j = 1, 2, \dots, N_{\text{branch}} \quad (11)$$

其中, β_i 为电流约束的置信水平; I_j 为第 j 条支路通过的电流; $I_j^{\max}$ 第 j 条支路允许通过的最大电流; N_{branch} 为配电网支路数。

此外,接入同一馈线的分布式电源和 EVPP 容量不宜超过一定的限值。EVPP 和分布式电源接入容量约束分别为:

$$S_{EV} \leq S_{EV\max} \quad (12)$$

$$\sum_{k=1}^{N_{PV}} S_{PVk} \leq S_{PV\max} \quad (13)$$

其中, S_{EV} 为 EVPP 接入容量; $S_{EV\max}$ 为系统最大允许接入 EVPP 容量; S_{PVk} 为第 k 个接入光伏电源的容量; N_{PV} 为接入光伏电源总数; $S_{PV\max}$ 为系统最大允许接入光伏电源容量。

2.5 粒子群优化算法

本文采用 Shi Y 和 Eberhart 等提出的改进粒子群优化算法^[17]进行优化求解。每个粒子位置采用 2 维向量描述,记第 i 个粒子的 2 维向量为 $\mathbf{X}_i = (x_{i1}, x_{i2})$,其中 x_{i1} 、 x_{i2} 分别表示 EVPP 容量和接入位置。本算例中接入位置可为馈线干线的任意位置,用接入点到变电站出线端的线路长度描述其位置,取值为 $[0, 6.2] \text{ km}$ 的连续值。根据线路载流能力, EVPP V2G 容量规模为 $\alpha(N_c w_{c0})$,其中步长系数 α 在 $[0, 100\%]$ 中以步长为 10% 连续取值。

以第 2.2 节的目标函数值作为衡量解优劣的适应度值,粒子位置的调整由飞行速度决定。记第 i 个粒子的飞行速度为 $\mathbf{V}_i = (v_{i1}, v_{i2})$,第 i 个粒子搜索中得到的最优位置为 $\mathbf{P}_i = (p_{i1}, p_{i2})$,整个粒子群搜索得到的最优位置为 $\mathbf{P}_g = (p_{g1}, p_{g2})$,则第 i 个粒子的速度和位置更新公式分别如下:

$$v_{id}^{k+1} = \omega v_{id}^k + c_1 \xi (p_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 \eta (p_{gd}^k - x_{id}^k) \quad (14)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + r v_{id}^{k+1} \quad (15)$$

其中, ξ 和 η 为区间 $[0, 1]$ 上均匀分布的独立伪随机数; $k = 1, 2, \dots, n$, 为迭代次数; $d = 1, 2$; ω 为惯性权重,用来平衡算法的全局搜索能力和局部搜索能力; c_1 和 c_2 为粒子群优化算法学习因子, c_1 为粒子对自身历史最优值进行跟踪选择的权重因数, c_2 为粒子对群体最优值进行跟踪选择的权重因数。算例中相关参数取值为: $c_1 = c_2 = 2$ 。并取最大搜索次数为 30 次。

3 配电网中 EVPP 优化接入的算例分析

3.1 算例说明

2.1 节中指出标准 EVPP 接入规划问题属于有

限数量候选方案的比选问题,可以应用第 1、2 节的模型枚举候选接入方案的目标函数值,选出最佳接入方案。本节为了获得具有一定通用性的分析结论,设计了更为复杂的优化研究算例。假设 EVPP 容量可任意设定,研究含分布式光伏的配电馈线中 EVPP 接入位置和容量的双参数优化问题,进而分析分布式电源位置和容量、负荷类型等因素对优化结果的影响,以期对 EVPP 接入选址得出一些具有指导性的结论。算例优化程序在 MATLAB 中编写。

不失一般性,算例馈线结构采用 IEEE RBTS 96 测试系统^[18]中母线 5 的第二条馈线模型,具体见附录中图 A3。取机会约束 $\beta_u = \beta_i = 90\%$,为反映不同的光伏渗透率水平以及负荷特性的影响,调整馈线的电源分布-负荷类型,设计了 18 个案例分别进行 V2G 接入优化并比较优化结果。表 1 列出了不用案例组合的标识符号。每个案例用两字母组合代指,如 RA 表示馈线为居民负荷,馈线前端接有 4 MW 光伏;OW 表示馈线为行政办公负荷,沿线无光伏接入等。

表 1 电源分布-负荷类型案例设计

Table 1 Case design of power distribution-load type

负荷类型	算例	光伏渗透率类型			光伏接入位置
		高渗透率 (4 MW, 66%)	中渗透率 (2 MW, 33%)	无光伏 接入	
居民负荷	R	—	W	—	—
		A	a	—	馈线前端
行政办公负荷	O	B	b	—	馈线中端
		C	c	—	馈线末端
		D	d	—	分散均衡分布

负荷采用广东电网典型类型的日负荷曲线和月最大负荷曲线。光伏功率用广州地区(北纬 23.2°)的光照辐射参数形成的年功率曲线。以 8 月工作日为例,图 1 给出了不同光伏渗透率下典型馈线日负荷的变化。可见光伏的接入增大了居民供电馈线的峰谷差,但是减小了行政办公用户所在馈线的峰谷差。

商场停车场的车辆流动性较大,其 EVPP 多为快充模式。因此本文主要考虑居民区和办公区的 EVPP 的 V2G 响应行为及其影响。

算例中根据区域典型负荷峰谷分布,设定电动汽车参与 V2G 的发电价格峰谷时段如下:峰时段为 09:00—11:00、13:00—16:00、18:00—19:00,谷时段为 01:00—06:00。充电桩占用率 $\varphi(t)$ 的时序曲线参考附录中图 A1 设置。取单个充电桩的充电功率等于放电功率 $w_{c0} = 15 \text{ kW}$,电池额定容量为 $90 \text{ kW}\cdot\text{h}$,用户参与 V2G 的概率 $\rho = 90\%$ 。参考实际作息规律,在车辆流动性较大时段(07:00—22:00),取停车场电动汽车电池储电水平在 0~100%之间等概率分布;在车辆停放较稳定时段(23:00 至次日 06:00),

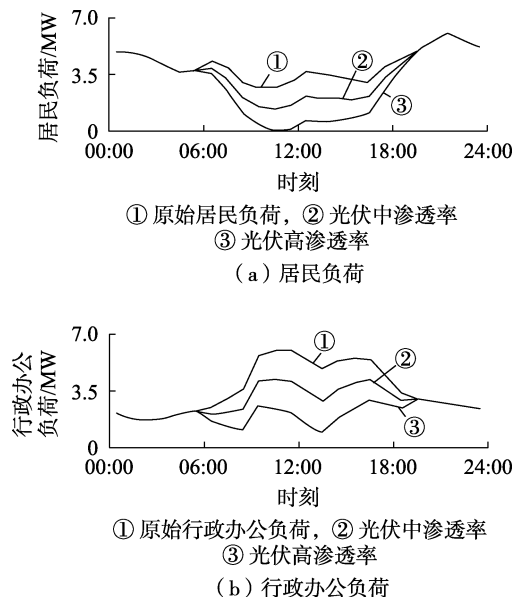


图 1 计及光伏出力的负荷分布

Fig.1 Load distribution considering photovoltaic output

停车场电动汽车电池初始储电水平在 0~50%之间等概率分布。以充电桩总数 $N_c = 500$ 为例,由式(3)计算得到的 EVPP 实际充放电功率日序列如图 2 所示。由图 2 可以看出,在峰、谷时刻 EVPP 均有明显充放电行为来响应电网移峰填谷需求。

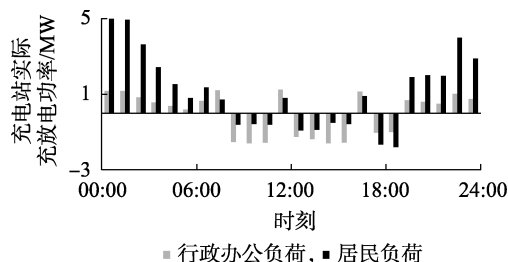


图 2 EVPP 实际充放电功率日分布

Fig.2 Daily distribution of actual charging and discharging power for EVPP

3.2 EVPP 接入优化结果分析

分别以配电网年功率损耗最小和电压波动最小为目标对 18 个案例逐一进行 EVPP 优化。36 个优化方案下计及 V2G 响应后的馈线网损和电压波动率相对于 V2G 接入前减少百分数见附录中图 A4。2 个优化目标分别对应的 V2G 最优接入位置和接入容量见附录中图 A5。图中 EVPP 接入位置表示与变电站距离占干线总长的百分比,V2G 容量表示 EVPP 容量相对馈线总负荷的百分比(容荷比)。同理,表 2 和表 3 中的接入位置和接入容量也采用百分数表述。

结合附录中图 A4 和图 A5 的优化结果,表 2 和表 3 分别列举了各个案例的具体优化情况。

由表 2 可知,从改善网损的角度出发,如果 EVPP 不得不接入不利于降损的馈线(算例 R),则应优先选择接入馈线首端且 EVPP 容量不宜太大

表 2 网损优化指标分析

Table 2 Analysis of network loss optimization index

电源分布-负荷类型		位置/%	容量/%	网损/%	
居民 负荷 (算例 R)	高渗透率	前端光伏 (A)	20.68	5.25	-4.29
		中端光伏 (B)	22.56	4.76	-2.29
		末端光伏 (C)	22.37	3.67	-3.07
		均匀分布 (D)	21.63	4.55	-1.32
	中渗透率	前端光伏 (a)	22.58	12.75	-1.10
		中端光伏 (b)	18.97	11.87	-1.05
		末端光伏 (c)	19.58	12.04	-0.88
		均匀分布 (d)	20.31	12.96	-0.99
	无光伏 (W)		23.05	12.50	-0.30
	行政办公 负荷 (算例 O)	高渗透率	前端光伏 (A)	76.14	26.67
中端光伏 (B)			19.92	54.38	4.32
末端光伏 (C)			21.56	56.03	3.46
均匀分布 (D)			25.88	36.27	2.78
中渗透率		前端光伏 (a)	77.47	24.39	8.11
		中端光伏 (b)	22.56	62.50	5.81
		末端光伏 (c)	23.02	63.04	5.90
		均匀分布 (d)	27.37	65.02	5.65
无光伏 (W)		55.86	59.08	6.50	

表 3 电压优化指标分析

Table 3 Analysis of voltage optimization index

电源分布-负荷类型		位置/%	容量/%	电压/%	
居民 负荷 (算例 R)	高渗透率	前端光伏(A)	64.13	38.86	2.24
		中端光伏(B)	66.13	14.25	-0.94
		末端光伏(C)	64.45	13.31	1.43
		均匀分布(D)	63.05	15.88	1.07
	中渗透率	前端光伏(a)	64.16	37.05	7.07
		中端光伏(b)	69.86	14.88	9.22
		末端光伏(c)	64.02	14.82	4.76
		均匀分布(d)	65.46	12.97	5.38
	无光伏(W)		62.63	37.28	6.50
	行政办公 负荷 (算例 O)	高渗透率	前端光伏(A)	66.57	65.72
中端光伏(B)			71.57	26.01	1.95
末端光伏(C)			65.73	15.45	3.43
均匀分布(D)			71.02	37.29	2.83
中渗透率		前端光伏(a)	70.96	53.74	8.46
		中端光伏(b)	72.74	36.05	7.72
		末端光伏(c)	63.39	39.52	5.26
		均匀分布(d)	66.38	50.57	7.00
无光伏(W)		65.78	52.12	8.20	

(容荷比不超过 10%, 见附录中图 A5 网损目标的算例 R 优化结果)。如果 EVPP 接入的是有利于降损的馈线(算例 O), 则其最优接入位置应远离分布式电源。在 EVPP 容量选择方面, 接入前半段时最优容量较大, 接入后半段时容量相对宜小一些。

由表 3 可知, 从改善沿线电压的角度出发, EVPP 应优先接入馈线后半段(附录中图 A5 以电压为目标的优化接入位置集中在距首端 60%~70% 区间内)。从最优 EVPP 容量的角度出发, 光伏电源位于前端时, EVPP 接入后半段的容量越大, 电压改善效果越好。合理选择 EVPP 接入位置后, V2G 行为能够改善沿线电压。若馈线负荷曲线的峰谷时段与分时电价峰谷时段明显相反(如算例 RA、RB、RC、

RD), 则电动汽车的 V2G 行为对电压的改善效果较差。

本算例中由于接有高比例光伏的居民供电馈线的谷荷时段恰好位于全网峰荷时段, 导致 EVPP 的 V2G 响应行为反而加大了馈线的峰谷差, 因此其网损及电压指标均难以有理想改善效果, 甚至会使得馈线网损增加。反之, 在行政办公负荷算例中合理配置 EVPP 可以改善配电馈线网损和电压。根据上述分析看出, 如果按照电网削峰填谷需求设定电动汽车参与 V2G 的分时电价, 则 EVPP 的 V2G 行为对所接入的配电馈线的影响未必是正面的, 与接入馈线的负荷曲线峰谷情况密切相关。综合得到结论如下。

a. EVPP 应优先接入负荷曲线峰谷时段与全网分时电价峰谷时段一致的配电馈线。

b. 当主要考虑网损指标, EVPP 接入居民负荷馈线时, 应优先选择接入馈线首端且 EVPP 容量不宜太大; 当 EVPP 接入行政办公负荷馈线时, 其最优接入位置应远离分布式电源, 接入前半段时最优容量较大, 接入后半段时容量相对宜小一些。

c. 当主要考虑电压指标时, EVPP 最优接入位置均为馈线后半段; EVPP 接入居民负荷馈线时, 接入容量不宜太大; EVPP 接入行政办公负荷馈线时, 接入容量为馈线总负荷的 60%~70%, 电压改善效果最佳。

综上所述, 降低网损和改善沿线电压 2 个目标对应的 EVPP 最优接入位置和接入容量普遍有较大的差异。因此在 EVPP 接入规划过程中, 应根据馈线本身的运行状况确定优先考虑的目标, 并按上述规则选择充电站接入方案。

4 结论

本文建立了停车场内电动汽车的 V2G 充放电策略模型。以改善馈线网损和沿线电压水平为目标, 建立了考虑 V2G 行为的停车场充电桩负荷接入配电馈线规划模型。典型配电馈线算例的优化研究表明, 充电型电动汽车停车场负荷应优先接入负荷曲线峰谷时段与全网分时电价峰谷时段一致的配电馈线。此外, 降低网损和改善沿线电压水平 2 个不同目标对应的最优 EVPP 接入位置和容量存在明显差异, 需要结合馈线状况和需求合理选择目标。归纳了不同优化目标对应的选址原则, 有助于实际工程的参考应用。

通过市场机制引导电动汽车的 V2G 行为以改善电网整体经济性是未来电力市场发展趋势之一。但 V2G 行为对高压电网和配电网的影响并非一致。因此需要关注不同激励机制下电动汽车 V2G 行为的建模和对配电网运行的影响分析, 通过合理规划

提高 V2G 整体效益。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] KNEZOVIC K, MARTINENAS S, ANDERSEN P B, et al. Enhancing the role of electric vehicles in the power grid: field validation of multiple ancillary services[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2017, 3(1): 201-209.
- [2] 王明深, 穆云飞, 贾宏杰, 等. 考虑电动汽车集群储能能力和风电接入的平抑控制策略[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(5): 1-8.
WANG Mingshen, MU Yunfei, JIA Hongjie, et al. Smoothing control strategy considering energy storage capability of electric vehicle aggregators and wind power integration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(5): 1-8.
- [3] 徐青山, 蔡婷婷, 刘瑜俊, 等. 考虑驾驶行为习惯及出行链的电动汽车充电站址规划[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(4): 59-65.
XU Qingshan, CAI Tingting, LIU Yujun, et al. A coordinated charging control strategy for electric vehicles charging load in residential area[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(4): 59-65.
- [4] 楚翊翔, 解大. 考虑电网运行状态的电动汽车充放储一体化充换电站充放电控制策略[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(4): 96-101.
CHU Haoxiang, XIE Da. Charging/discharging control strategy of EV charging-discharging-storage integrated station considering operational status of power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(4): 96-101.
- [5] 李志伟, 赵书强, 刘应梅. 电动汽车分布式储能控制策略及应用[J]. 电网技术, 2016, 40(2): 442-450.
LI Zhiwei, ZHAO Shuqiang, LIU Yingmei. Control strategy and application of distributed electric vehicle energy storage[J]. Power System Technology, 2016, 40(2): 442-450.
- [6] 潘樟惠, 高赐威, 刘顺桂. 基于需求侧放电竞价的电动汽车充放电调度研究[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 1140-1146.
PAN Zhanghui, GAO Ciwei, LIU Shungui. Research on charging and discharging dispatch of electric vehicles based on demand side discharge bidding[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 1140-1146.
- [7] 姚伟锋, 赵俊华, 文福拴, 等. 集中充电模式下的电动汽车调频策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 69-76.
YAO Weifeng, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. Frequency regulation strategy for electric vehicles with centralized charging[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 69-76.
- [8] 徐智威, 胡泽春, 宋永华, 等. 基于动态分时电价的电动汽车充电站有序充电策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3638-3646.
XU Zhiwei, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Coordinated charging strategy for PEV charging stations based on dynamic time-of-use tariffs[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3638-3646.
- [9] 高亚静, 王辰, 吕孟扩, 等. 计及车主满意度的电动汽车最优峰谷分时电价模型[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(2): 8-13.
GAO Yajing, WANG Chen, LÜ Mengkuo, et al. Optimal time-of-use price model considering satisfaction degree of electric vehicle owners[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(2): 8-13.
- [10] 贾龙, 胡泽春, 宋永华, 等. 储能和电动汽车充电站与配电网的联合规划研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 73-83.
JIA Long, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Joint planning of distribution networks with distributed energy storage systems and electric vehicle charging stations[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 73-83.
- [11] 刘畅, 刘洪, 李香龙, 等. 考虑路网与配电网可靠性的电动汽车充电站多目标规划[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(8): 28-34.
LIU Chang, LIU Hong, LI Xianglong, et al. Multi-objective EV charging station planning with consideration of road network reliability and distribution network reliability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 28-34.
- [12] 刘舒, 李正力, 王翼, 等. 含分布式发电的微电网中储能装置容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 78-84.
LIU Shu, LI Zhengli, WANG Yi, et al. Optimal capacity allocation of energy storage in micro-grid with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 78-84.
- [13] 陶琼, 桑丙玉, 叶季蕾, 等. 高光伏渗透率配电网中分布式储能系统的优化配置方法[J]. 高电压技术, 2016, 42(7): 2158-2165.
TAO Qiong, SANG Bingyu, YE Jilei, et al. Optimal configuration method of distributed energy storage systems in distribution network with high penetration of photovoltaic[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(7): 2158-2165.
- [14] 张那. 城市公共停车设施规划研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2009.
ZHANG Na. Research on the urban public parking facilities planning[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2009.
- [15] LÜ Yaotang, GUAN Lin, TANG Zongshun, et al. A probability model of PV for the middle-term to long-term power system analysis and its application[J]. Energy Procedia, 2016, 103: 28-33.
- [16] 王一波, 许洪华. 基于机会约束规划的并网光伏电站极限容量研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(22): 22-28.
WANG Yibo, XU Honghua. Research of capacity limit of grid-connected photovoltaic power station on the basis of chance-constrained programming[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(22): 22-28.
- [17] SHI Y, EBERHART E. A modified particle swarm optimizer[C]// 1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings. [S.l.]: IEEE, 1998: 69-73.
- [18] BILLINTON R, JONNAVITHULA S. A test system for teaching overall power system reliability assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(4): 1670-1676.

作者简介:



吕耀棠

吕耀棠(1992—),男,广东广宁人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统分析与规划、可再生能源应用分析等(E-mail: tracce_tam@163.com);

管霖(1970—),女,湖北孝感人,教授,博士,主要研究方向为电力系统运行分析与控制(E-mail: lguan@scut.edu.cn)。

(下转第 14 页 continued on page 14)

nologies. Kathmandu, Nepal; IEEE, 2012; 30-35.

- [11] THRIMAWITHANA D J, MADAWALA U K, NEATH M. A P&Q based synchronization technique for bi-directional IPT pick-ups[C]// IEEE Ninth International Conference on Power Electronics and Drive Systems. Singapore: IEEE, 2011; 40-45.

作者简介:

朱望诚(1988—),男,海南海口人,助理工程师,主要从事继保自动化、配网自动化技术方面的工作(E-mail:



朱望诚

362084812@qq.com);

谢振超(1988—),男,海南海口人,助理工程师,主要从事配网自动化技术方面的工作(E-mail: 18907683283@163.com);

万信书(1990—),男,海南儋州人,助理工程师,从事电力系统继电保护及其自动化方面的工作(E-mail: wanxinshu@126.com)。

Key parameter monitoring technique for electric vehicle V2G system based on wireless power transfer technology

ZHU Wangcheng, XIE Zhenchao, WAN Xinshu

(Electric Power Research Institute of Hainan Power Grid Co., Ltd., Haikou 570125, China)

Abstract: The application of wireless power transfer technology in the field of electric vehicle V2G (Vehicle to Grid) has important theoretical and practical values. The principle of the bi-directional wireless power transfer system is analyzed, based on which, the phase angle difference affecting the power transfer direction and the voltage ratio affecting the transfer efficiency are discussed. The above two parameters are monitored real-timely by installing probe coils on the secondary side coaxially with the primary coil, and the method of obtaining the parameters is given. Simulation and experiment are designed to verify the feasibility of the proposed method.

Key words: bi-directional wireless power transfer; electric vehicles; V2G; parameter monitoring

(上接第7页 continued from page 7)

Research on V2G model of EPVV and its optimal scheme accessing to distribution network

LÜ Yaotang¹, GUAN Lin², ZHAO Qi², ZHOU Baorong³

(1. China Southern Power Grid Power Dispatching and Control Center, Guangzhou 510623, China;

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

3. China Southern Power Grid Scientific Research Institute, Guangzhou 510663, China)

Abstract: From the perspective of distribution network power flow analysis, the power model of V2G (Vehicle to Grid) driven by electricity price is established. To address the problem of selecting the feeder and connecting point of the EVPP (Electric Vehicle Plug-in Parking lot) load connected to the distribution network, the accessing planning model considering V2G behaviors is proposed with the objective of reducing the feeder power loss and intraday voltage fluctuation. The impacts of load type and photovoltaic penetration on planning scheme are analyzed with actual examples. Test results show that the V2G behavior of the electric vehicle has significant impacts on the operating benefits of distribution network, moreover, the V2G behavior of EVPP under inappropriate accessing schemes may negatively impact the operation of distribution networks.

Key words: distribution network planning; electric vehicles; V2G; electricity price; load; photovoltaic penetration

附录

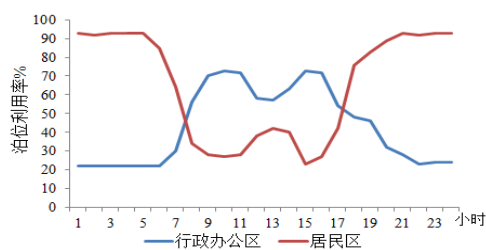


图 A1 行政办公区和居民区的时序泊位利用率

Fig.A1 Sequential parking utilization of administrative office area and residential area

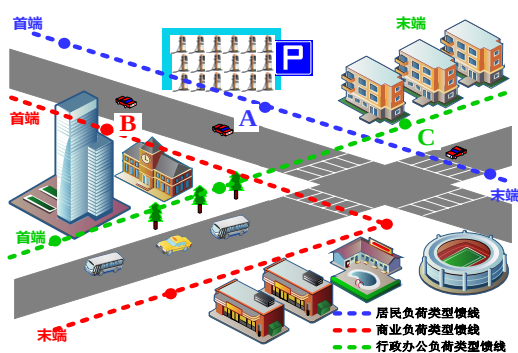


图 A2 EVPP 接入规划示意图

Fig.A2 Planning of EVPP connecting to grid

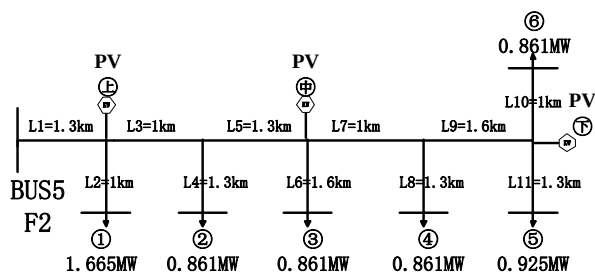


图 A3RBTS96 BUS-5 Feeder2 线路和负荷信息

Fig. A3 Line and load information for RBTS96 BUS-5

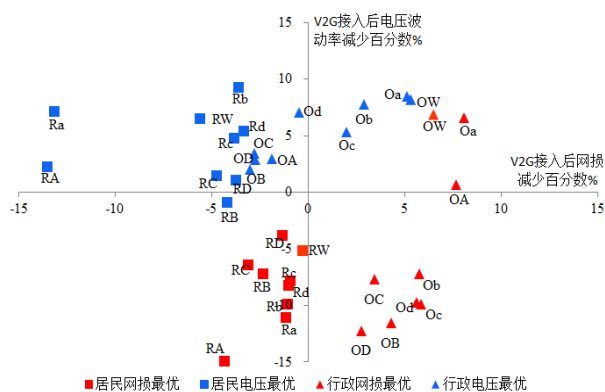


图 A4 不同目标优化结果的指标分布

Fig.A4 Optimization results with different targets

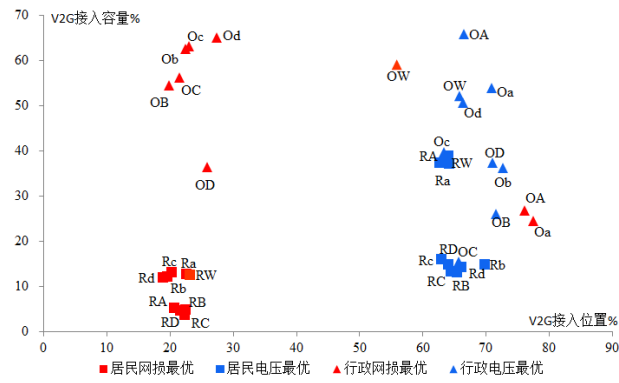


图 A5 各个场景下 EVPP 最优接入位置和接入功率

Fig.A5 Optimal EVPP location and power under various scenarios