

计及车主满意度的电动汽车最优峰谷分时电价模型

高亚静¹,王 辰²,吕孟扩¹,梁海峰¹

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室,河北 保定 071003;

2. 中广核工程有限公司,广东 深圳 518124)

摘要: 分析了电动汽车随机充电模型以及 V2G 放电模型,建立了电动汽车车主对电价变化的需求响应模型。设计了一套能够影响电动汽车充、放电行为的最优峰谷分时电价定价方案,该方案能同时兼顾电网的利益、电动汽车车主的利益和电动汽车车主的满意度。算例验证表明,该方案求解得到的最优峰谷分时电价能够有效地引导电动汽车在谷时段充电、峰时段放电,在改善负荷曲线的同时兼顾了车主的满意度。

关键词: 电动汽车; V2G; 峰谷分时电价; 满意度; 模型

中图分类号: TM 73;U 469.72

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.02.002

0 引言

在能源危机及环境污染的大背景下,电动汽车因零污染、低噪音等优点,获得了愈来愈多的关注。考虑到电动汽车充电行为的随机性,大量电动汽车接入会给电力系统的运行与控制带来显著的不确定性^[1-3],此外电动汽车还可以在用电高峰期将电能放回电力系统中,即 V2G(Vehicle to Grid)^[4-6]。如果没有相应的政策和手段来对其充、放电行为进行引导,那么大规模的电动汽车无序充放电行为将对电力系统的运行与规划产生非常不利的影响^[7-9]。由于电动汽车充放电行为是完全从属于车主的私人意愿,常规的调度手段将不再适用于电动汽车,而峰谷分时电价能够通过自身的经济杠杆作用来刺激和鼓励电动汽车改变其充放电行为,使得电网和电动汽车车主双方面均收益^[10-12]。

本文从影响电动汽车功率需求的两大因素,即充电开始时刻以及日行驶里程入手,建立了电动汽车的充、放电功率模型,然后基于电动汽车车主满意度以及电网利益的考虑,设计了适用于电动汽车充电的最优峰谷分时定价方案。

1 电动汽车充电功率建模

1.1 假设条件

本文以利用分布式充电桩进行常规慢速充电的电动汽车作为研究对象,并建立其充电模型。

单台电动汽车充电模型的建立可通过该电动汽车的充电开始时刻以及充电时长得到。开始充电时刻和日行驶里程则取决于用户的出行习惯和行驶特性,最后行驶返回时刻以及日行驶里程在本文中被

认为是相互独立的^[13]。

参考目前电动汽车的发展状况,本文对使用充电桩充电的私家车做出如下假设:

a. 每 100 km 耗电量固定为 15 kW·h;

b. 在分时电价未实施的情况下,电动汽车在每日最后一次出行返回后开始充电;

c. 本文的充电过程将近似为恒功率特性,因为对于使用充电桩进行常规慢速充电,充电起始和结束阶段相对于整个充电过程而言较短,可以忽略;

d. 每次充电都充至满电量;

e. 在本文中 V2G 的放电被认为是一个负的负荷,并且其相关特性与充电相似;

f. 最后行驶返回时刻及日行驶里程是相互独立的随机变量;

g. 由于本优化模型不影响电动汽车的充电次数,所以不计由于电动汽车电池充电造成的动力电池本身损耗的成本。

1.2 最后一次行程结束时刻和日行驶里程概率模型

用极大似然估计的方法分别将车辆最后行程返回时刻和日行驶里程近似为正态分布和对数正态分布。最后一次行程结束时刻,即开始充电时刻,其概率密度函数可表示为^[14]:

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

其中, t 为开始充电时刻; $\mu_s=17.6$; $\sigma_s=3.4$ 。

日行驶里程表示一辆电动汽车单日内行驶里程,其服从对数正态分布,概率密度函数表示为:

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

其中, s 为电动汽车日行驶里程; $\mu_D=3.20$; $\sigma_D=0.88$ 。

为简化分析,设定从 i 到 $i+1$ 时刻内开始充电的

收稿日期:2013-02-28;修回日期:2013-12-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51177047);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(12MS107)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51177047) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(12MS107)

电动汽车均从 i 时刻开始充电,表示为:

$$N_i = \int_i^{i+1} N f_s(t) dt \quad (3)$$

其中, $N_i (i=1, 2, \dots, 24)$ 为从 i 到 $i+1$ 时刻内开始充电的电动汽车数量; N 为电动汽车的总数量。

基于电动汽车不同的日行驶里程,本文对其进行分类:如果一辆汽车日行驶里程处于 $0 \sim m$ km 的范围内,则认为该辆车日行驶里程为 m km,并标记为第 1 类电动汽车;行驶里程在 $m \sim 2m$ km 范围内,则认为该辆车日行驶里程为 $2m$ km,并标记为第 2 类电动汽车;同理,不同日行驶里程的汽车将会被分为若干类别。

因此,在 i 时刻开始充电的行驶里程为第 k 类的电动汽车数量可表示为:

$$N_{ik} = \int_{(k-1)m}^{km} N f_D(s) ds \quad (4)$$

在 i 时刻开始充电的行驶里程为第 k 类电动汽车的充电时长可表示为:

$$T_{ik} = \frac{S_k W}{100 P_c} \quad (5)$$

其中, S_k 为行驶里程为第 k 类的电动汽车的日行驶里程; W 为汽车每行驶 100 km 所消耗的电能; P_c 为充电功率。

2 电动汽车充放电的需求响应模型

本文将电动汽车的行驶状态分为如下 2 种。

第 1 种是日常行驶和作为储能装置在负荷高峰时段向电网放电。为便于分析,本文假设第 1 种状态的时间段为结束当天行程时刻的前 12 h。

第 2 种是结束当天行程后的充电状态。第 2 种状态为结束当天行程时刻的后 12 h,这就意味着电动汽车必须在结束当天行驶时刻之后的 12 h 内充满电。

在峰谷分时电价方案实施后,根据电动汽车对电价的响应方式不同,将电动汽车分为 A、B、C 3 类。

a. A 类电动汽车:在峰谷分时电价方案实施后,此类电动汽车将改变充电开始时刻,转移充电负荷,以获取相对低廉的电费支出,但此类电动汽车不参与 V2G 放电。

b. B 类电动汽车:在峰谷分时电价方案实施后,不改变充电开始时刻,但参与 V2G,在能够获得放电收益的时段向电网送电,并因此相应地延长充电时长。

c. C 类电动汽车:在峰谷分时电价方案实施后,既不改变充电开始时刻也不参与 V2G,即对电价无任何响应,与峰谷分时电价方案实施前的充电行为并无二致。

在对电动汽车状态以及响应分类的基础上,研究

电动汽车用户的电力需求对电价的具体响应是实现电动汽车充、放电建模的关键步骤。一般情况下,当电价升高时充电的需求会相应减少。在 V2G 模式下,放电量将会随电价增长而上升。对于电价所引发的电力需求侧响应即所谓的由弹性系数所表示的需求价格弹性如下^[15]:

$$\varepsilon = \frac{\Delta d / d_0}{\Delta p / p_0} \quad (6)$$

其中, Δd 和 Δp 分别为需求与价格的变化量; d_0 和 p_0 分别为需求和价格的基准值。

负荷特征不同的用户对电价的敏感度各不相同。目前电力公司将用户基本分为大用户、非工业和普通工业(简称非、普工业)、商业、农业、非居民照明、居民用电六大类。每种类型用户对应一种对电价反应曲线。本文通过文献[16]中得到的居民分时电价综合反应曲线来近似表征电动汽车用户对电费的响应关系:

$$\varphi(x) = -0.972x^3 + 2.7968x^2 - 2.5179x + 0.701 \quad (7)$$

其中, x 为电费变化率; $\varphi(x)$ 为车辆数量变化率。

2.1 A 类电动汽车的需求响应模型

一辆在 i 时刻开始充电、行驶里程为第 k 类的电动汽车,其达到满充所需缴电费表示为:

$$Q_{ik} = \sum_{n=i}^{i+T_{ik}} P_c p_n \quad (8)$$

其中, Q_{ik} 为一辆第 k 类汽车在 i 时刻开始充电直至满充所交的电费; p_n 为 n 时刻的电价。

考虑到充电时长,在 i 时刻开始充电、行驶里程为第 k 类的电动汽车能够将充电开始时刻从 i 转移至使充电费用最小的时刻 j ($j \in (i+1, i+2, \dots, i+12-T_{ik})$),一方面满足结束当天行驶时刻之后的 12 h 内充满电的设定,另一方面达到负荷转移的目的。因此,对于 A 类电动汽车,在峰谷分时电价实施后,行驶里程为第 k 类的电动汽车在 j 时刻开始充电的数量等于从 i 时刻转移至 j 时刻的数量,记作 N_{jk}^A :

$$N_{jk}^A = \sum_{j=1}^{24} [\varphi((Q_{ik} - Q_{jk}) / Q_{ik}) N_{ik}] \quad (9)$$

2.2 B 类电动汽车的需求响应模型

日行驶里程为第 k 类的电动汽车的放电能力是满状态下电池电量与日行驶所消耗的电量之间的差额,日行驶里程越大的汽车用于行驶的电能消耗得越多,所具备的放电能力就越小,反之则放电能力越大。在恒定的放电功率情况下,其放电能力可用放电时长来表示:

$$T_k^{V2G} = \frac{(S_{\max} \eta - S_k) W}{100 P_d} \quad (10)$$

其中, $S_{\max}$ 为最大日行驶里程,用以表征满状态下电池电量; η 为放电的容量约束,表示实际中电池放电不能全放完; P_d 为放电功率。

设峰时刻为 $t_1, t_2, \dots, t_f$, 考虑到峰谷时刻的划分安排, 日行驶里程为第 k 类, 在 $i(i \in (t_1, t_2, \dots, t_f, \dots, t_f + 12))$ 时刻下开始充电的电动汽车均可以不同程度地参与 V2G 向电网放电。其最终放电时长与 i 和 k 这 2 个变量有关, 经过相关计算比较, 可得到使电动汽车用户受益最大化的实际最终放电时长的值, 记作 T_{ik}^{V2G} 。

由于参与 V2G 的电动汽车将多余的电能向电网放电, 其充电时间将会相应地延长, 记作 T_{ik}^B :

$$T_{ik}^B = T_{ik}^{V2G} + T_{ik} \quad (11)$$

在电价的刺激下, 在 i 时刻的第 k 类电动汽车参与 V2G 项目时, 其所应缴纳的电费等于充电费用减去放电收益, 可由下式得到:

$$Q_{ik}^{V2G} = \begin{cases} \sum_{n=i}^{i+T_{ik}^B} P_c \rho_n - \sum_{n=i-T_{ik}^{V2G}}^{i-1} P_d \rho_n & i \in (t_1, t_2, \dots, t_f) \\ \sum_{n=i}^{i+T_{ik}^B} P_c \rho_n - \sum_{n=t_f+1-T_{ik}^{V2G}}^{t_f} P_d \rho_n & i \in (t_f+1, t_f+2, \dots, t_f+12) \end{cases} \quad (12)$$

因为 B 类电动汽车在峰谷电价实施后比之前多了放电行为, 这将会导致对电池价值的额外损耗, 故将电池的放电损耗纳入成本分析。

选择参与 V2G 放电的汽车数量因峰谷电价的拉大而增加。参与 V2G 的 i 时刻、行驶里程为第 k 类的电动汽车数量记作 N_{ik}^B , 表示如下:

$$N_{ik}^B = \varphi((Q_{ik} - Q_{ik}^{V2G} - V\tau/\gamma)/Q_{ik})(N_{ik} - N_{ik}^A) \quad (13)$$

其中, V 为动力电池成组后的单位成本; τ 为电动汽车电池的装载容量; γ 为电池充放循环次数; $Q_{ik} - Q_{ik}^{V2G}$ 为参与 V2G 的单台电动汽车在选择不参与 V2G 与参与 V2G 时所缴电费差额, 其值必须大于因 V2G 所导致的电池价值的损耗, 否则车主会因为参与 V2G 得不偿失而拒绝向电网送电。

2.3 C 类电动汽车的需求响应模型

对于对电价无响应的 C 类电动汽车而言, 在 i 时刻第 k 类汽车数量可表示为:

$$N_{ik}^C = N_{ik} - N_{ik}^A - N_{ik}^B \quad (14)$$

根据以上公式, 在实施峰谷分时电价和 V2G 后, 每个时刻的平均负荷可由式(15)计算得出:

$$l = l(\rho_f, \rho_p, \rho_g) \quad (15)$$

其中, ρ_f, ρ_p, ρ_g 分别为峰、平、谷时段电价。

3 最优峰谷分时电价求解模型

本文所建立的峰谷电价模型旨在统筹考虑电网及车主双方的利益, 一方面利用削峰填谷来提高电网负荷率, 另一方面人性化地提高车主对峰谷分时电价制定的满意程度。

3.1 用户满意度

本文中的用户满意度是指从电动汽车车主用电

方式和电费支出 2 个方面进行考虑。

a. 用电方式的满意度是衡量用户用电方式变化的指标, 在未实行峰谷电价之前, 车主在结束当日行程后立即进行充电, 此时用户的用电方式满意度最大。实行峰谷电价后, 车主通过改变开始充电时刻以及是否参与 V2G 来减少电费, 从而形成新的负荷曲线, 这意味着车主用自己的一部分用电自由来换取经济利益, 因此用电方式的满意度可表示为:

$$\lambda = 1 - \frac{\int_1^{24} |l(t, \rho_f, \rho_p, \rho_g) - l(t)| dt}{\int_1^{24} l(t) dt} \quad (16)$$

其中, $l(t, \rho_f, \rho_p, \rho_g)$ 为电动汽车在实施峰谷电价后在 t 时刻的负荷; $l(t)$ 为实施峰谷电价前在 t 时刻的负荷。

b. 电费支出满意度是衡量用户电费支出的变化量的指标。在本文中, C 类车主的充电行为不因峰谷电价而改变, 这将导致他们所缴的电费会有明显增加, 因此不能仅仅考虑电网公司和部分车主的利益而过分损害这一部分车主的利益, 制定电价方案时应当考虑这部分车主的电费不会因峰谷拉开比扩大而过分增加, 电费支出满意度可表示为:

$$\theta = 1 - \frac{Q(t, \rho_f, \rho_p, \rho_g) - Q_0}{Q_0} \quad (17)$$

其中, $Q(t, \rho_f, \rho_p, \rho_g)$ 为该部分电动汽车实施峰谷电价后所缴电费; Q_0 为实施峰谷电价前所缴电费。

3.2 目标函数

本文的优化目标为峰负荷最小、峰谷差最小、电动汽车购电费用 R_2 最小、全体电动汽车用户用电方式满意度 λ 最大以及 C 类电动汽车用户电费支出满意度 θ 最大这 5 个目标函数:

$$\begin{cases} \min F_1 = \min [\max_{1 \leq i \leq 24} (l_i + L_i)] \\ \min F_2 = \min [\max_{1 \leq i \leq 24} (l_i + L_i) - \min_{1 \leq i \leq 24} (l_i + L_i)] \\ \min F_3 = \min R_2 \\ \max F_4 = \max \lambda \\ \max F_5 = \max \theta \end{cases} \quad (18)$$

其中, l_i 为电动汽车在实施峰谷电价后在 t 时刻的负荷; L_i 为一组某地区典型日负荷数据。

约束条件包括确保供电公司获利、确保车主收益以及对电价范围的约束, 表示如下:

$$\begin{cases} R_1 = \rho^0 \sum_{i=1}^{24} l_i^0 \\ R_2 = \sum_{i=1}^{24} \rho_i l_i \\ R_2 + X_1 + X_2 > R_1 \\ R_2 < R_1 \\ \rho_{\min} < \rho_i < \rho_{\max} \end{cases} \quad (19)$$

其中, ρ^0 为峰谷分时电价实施前的电价; l_i^0 为峰谷分

时电价实施前在 t 时刻的电动汽车用电量; ρ_t 为峰谷分时电价实施后在 t 时刻的电价; X_1 为供电侧缓建电网的收益; X_2 为政府对供电公司的补贴; R_1 为实施分时电价前全体电动汽车的电费; R_2 为实施分时电价后全体电动汽车的电费; $\rho_{\max}$ 、 $\rho_{\min}$ 为监管部门规定的电价的上、下限。

本文利用粒子群算法^[12]对多目标分时电价优化问题进行求解,得到一组 Pareto 最优非劣解,并根据模糊集理论来确定最优折中解,每个 Pareto 解中各目标函数对应的满意度 u_i 可用偏小型半梯形和偏大型半梯形模糊隶属度函数来表示,其中偏小型半梯形模糊隶属度函数定义如下:

$$u_i = \begin{cases} 1 & f_i < f_i^{\min} \\ \frac{f_i^{\max} - f_i}{f_i^{\max} - f_i^{\min}} & f_i^{\min} \leq f_i \leq f_i^{\max} \\ 0 & f_i > f_i^{\max} \end{cases} \quad (20)$$

其中, $f_i^{\max}$ 为第 i 个目标函数的最大值; $f_i^{\min}$ 为第 i 个目标函数的最小值。再采用下式求得 Pareto 解集中各个解的标准化满意度:

$$\mu = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 u_i \quad (21)$$

最后通过比较,选取出具有最大 μ 值的 Pareto 最优解作为最优折中解。

4 算例

以一组某地区典型日负荷数据为基础负荷,在没有分时电价实施的情况下,叠加电动汽车充电负荷,形成了电动汽车接入电网随机充电后的负荷曲线。在这条负荷曲线的基础上,利用 K 均值聚类可以划分出峰谷平时段。再根据电动汽车充放电需求响应模型,可以得到实施峰谷分时电价以及 V2G 情况下的负荷曲线。将所得到的负荷曲线代入最优峰谷电价优化模型,可得到基于电动汽车车主满意度的最优峰谷电价方案。

电动汽车充放电相关参数设置如下: $W=15 \text{ kW}\cdot\text{h}$, $P_c=5 \text{ kW}$, $P_d=5 \text{ kW}$, $N=300\,000$, $S_{\max}=300 \text{ km}$, $\rho^0=0.6213 \text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$, $V=1000 \text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$, $\tau=45 \text{ kW}\cdot\text{h}$, $\gamma=4500$, $\eta=0.8$ 。

图 1 中电动汽车的充电功率曲线与典型日负荷数据相叠加得到包含电动汽车充电功率的负荷曲线,图中横坐标 6 是表示时段 06:00—07:00,其他依此类推。随着电动汽车的接入,日最大负荷从 1271.5 MW 增加到 1494.8 MW,增长了 14.94%,峰谷差从 469 MW 增加到 683.5 MW,增长了 45.74%。在电价为 0.6213 元/(kW·h)的情况下总电费为 1224500 元。

根据图 1 可做出峰谷时段划分,采用基于 K 均值聚类算法的峰谷时段划分方法可对峰谷时段进行有

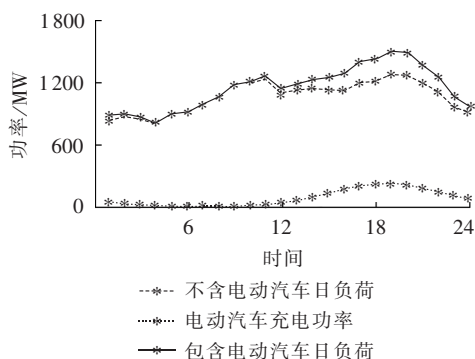


图 1 未实行峰谷电价的电动汽车负荷
Fig.1 EV loads before implementation of TOU price

效划分,本文中包含电动汽车充电功率的负荷曲线的峰谷时段划分如下:谷时段为时段 1—8、23、24,平时段为时段 9—16,峰时段为时段 17—22。

最优的峰谷平时段电价方案可以通过对目标函数求解得出,即 $\rho_g=0.2058 \text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$, $\rho_p=0.4413 \text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$, $\rho_f=1.0566 \text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。

在峰谷分时电价实施后,3类电动汽车的负荷曲线由图 2 所示。最优峰谷分时电价执行后的负荷曲线见图 3,由图 3 可知,日最大负荷从 1494.8 MW 减到 1335.3 MW,峰谷差从 683.5 MW 减到 424.2 MW。电动汽车用户所缴电费为 872740 元,C类电动汽车用户的电费支出满意度 61.9%,总体电动汽车用户的用电满意度 92.7%。可见在分时电价以及 V2G 实

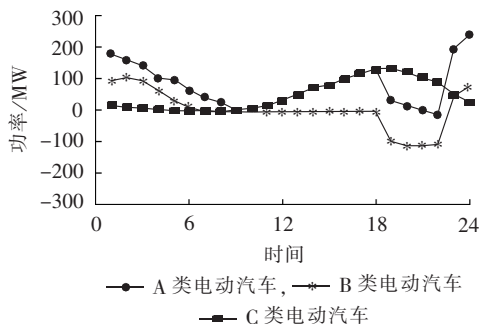


图 2 A、B、C 3 类电动汽车的负荷曲线
Fig.2 Load curves of EV-type A,B and C

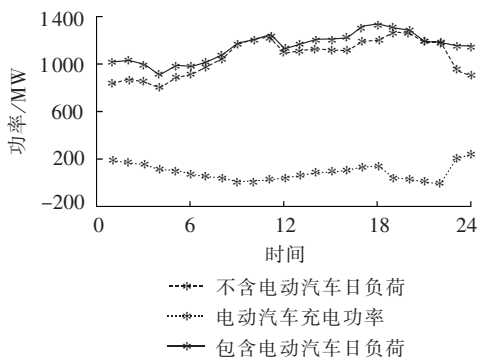


图 3 执行 V2G 的负荷曲线
Fig.3 Load curves after implementation of V2G

施后,在保持电动汽车车主满意度的同时,负荷曲线得到了很大的改善。

表 1 为分时电价及 V2G 实施前后各项指标的对比。由表 1 可知,在没有实施分时电价的情况下,电动汽车的无序充电加重了电网负担;而在实施了分时电价后,电网的峰负荷、峰谷差以及电动汽车的电费得到了大幅的降低。

表 1 分时电价以及 V2G 实施前后各项指标的对比
Tab.1 Comparison of indicators between before and after implementation of TOU and V2G

分时电价	日最大负荷/MW	峰谷差/MW	电费/元
未实行	1494.8	683.5	1 224 500
实行	1335.3	424.2	872 740

5 结论

本文建立了电动汽车对分时电价的需求响应模型,综合考虑电网及车主满意度双方面的利益,在 Pareto 优化理论基础上,采用粒子群算法对适用于电动汽车充放电的最优峰谷电价方案进行了求解。算例验证表明,在实施峰谷分时电价的前提下,通过 V2G 车主能够利用闲置的电动汽车在峰时段放电从而获取收益,对于电网,由于 V2G 能改善负荷曲线,在一定程度上减少了对峰荷机组以及线路的投资。

参考文献:

[1] ADOLFO P,BIAGIO C. The introduction of electric vehicles in the private fleet:potential impact on the electric supply system and on the environmen[J]. Energy Policy,2010,38(8):4549-4561.

[2] WANG Y,NGUYEN B M,FUJIMOTO H,et al. Multirate estimation and control of body slip angle for electric vehicles based on onboard vision system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2014,61(2):1133-1143.

[3] HU W H,SU C,CHEN Z,et al. Optimal operation of plug-in electric vehicles in power systems with high wind power penetrations[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy,2013,4(3):577-585.

[4] PIELTAIN F,GOMEZ S R,COSENT R,et al. Assessment of the impact of plug-in hybrid electric vehicles on distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2011,26(1): 206-213.

[5] LIU H ,HU Z C,SONG Y H,et al. Decentralized vehicle-to-grid control for primary frequency regulation considering charging demands [J]. IEEE Transactions on Power Systems,2013,28(3): 3480-3489.

[6] CHRISTOPHE G,GEORGE G. A conceptual framework for the Vehicle-to-Grid (V2G) implementation[J]. Energy Policy,2009,37 (6):4379-4390.

[7] 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.

[8] TOMIC J,KEMPTON W. Using fleets of electric-drive vehicles for grid support[J]. Power Sources,2007,168(2):459-468.

[9] MATTHIAS D G,MAREK Z,GORAN A. On integration of plug-in hybrid electric vehicles into existing power system structures[J]. Energy Policy,2010,38(5):6736-6745.

[10] 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 electrics vehicle charging on power grid[J]. Power System Technology, 2011,35(2):127-131.

[11] CLEMENT N K,HAESSEN E,DRIESEN J. The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution grid [J]. IEEE Transactions on Power Systems,2010,25(1):371-380.

[12] 何明杰,彭春华,曹文辉,等. 考虑电动汽车规模化入网的动态经济调度[J]. 电力自动化设备,2013,33(9):82-88.

HE Mingjie,PENG Chunhua,CAO Wenhui,et al. Dynamic economic dispatch considering large-scale integration of electric vehicles[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(9): 82-88.

[13] 田立亭,史双龙,贾卓. 电动汽车充电功率需求的统计学建模方法[J]. 电网技术,2010,34(11):126-130.

TIAN Liting,SHI Shuanglong,JIA Zhuo. A statistical model for charging power demand of electric vehicles[J]. Power System Technology,2010,34(11):126-130.

[14] TRINE K K,KARSTEN C,PETER M. Optimal charging of electric drive vehicles in a market environment[J]. Applied Energy, 2011,88(2):1940-1948.

[15] 董琳琳. DSM 中用户反应度建模及成本效益分析的研究[D]. 保定:华北电力大学,2006.

DONG Linlin. Study of consumer response model and cost benefit analysis of DSM[D]. Baoding:North China Electric Power University,2006.

[16] 唐剑东,熊信银,吴耀武,等. 基于改进 PSO 算法的电力系统无功优化[J]. 电力自动化设备,2004,24(7):81-84.

TANG Jiandong,XIONG Xinyin,WU Yaowu,et al. Power system reactive power optimization based on modified particle swarm optimization algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004,24(7):81-84.

作者简介:



高亚静(1980-),女,河北饶阳人,讲师,博士,研究方向为电力经济、电网调度自动化(E-mail:commoncat@163.com);

王 辰(1986-),男,江西吉水人,工程师,硕士,研究方向为电动汽车;

吕孟扩(1986-),男,黑龙江齐齐哈尔人,工程师,硕士,研究方向为电动汽车;

梁海峰(1976-),男,河北保定人,副教授,博士,研究方向为直流输电、电力系统分析与控制。

电动汽车车载充电机接入住宅区配电网谐波研究

魏大钧, 孙 波, 张承慧

(山东大学 控制科学与工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 分析了车载充电机接入小区低压配电网产生的谐波特征。基于 Simulink 平台建立了含车载充电机的住宅区传统三相配电网和新型单相配电网仿真模型, 结合对配电变压器阻抗特性的研究, 对比分析了 2 种配电模式下不同数量电动汽车接入充电产生谐波的变化规律。结果表明: 随着车载充电机接入数量增多, 2 种配电模式下的谐波电流变化平缓, 但电压畸变率均明显增大; 在相同数量充电机接入情况下, 配电容量越大, 系统电压畸变越小; 单相配电的电压谐波畸变较三相配电可增幅 70% 以上, 对谐波耐受力较差。

关键词: 电动汽车; 车载充电机; 充电; 住宅区配电; 谐波分析; 变压器容量

中图分类号: TM 76; U 469.72

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.02.003

0 引言

随着石油资源紧缺与汽车污染等问题的加剧, 发展电动汽车已是势在必行^[1]。而大规模无序充电行为将会严重影响电网的安全、经济运行, 因此研究电动汽车调度策略^[2-3]与充电设施规划^[4-5]至关重要。

目前电动汽车电能补给模式可分为常规充电、快速充电和电池更换 3 种。从长期来看, 随着电动汽车的逐步普及, 利用安装在住宅小区、停车场内的交流充电桩进行常规充电应是电动汽车充电的主流模式。但车载充电机为非线性负载, 其大规模接入将给小区配电网带来很大的谐波。因此, 合理规划小区配电, 以减小车载充电机带来的谐波影响, 对电动汽车的普及具有重要意义^[6]。

受电动汽车内部空间所限, 车载充电机功率较

小, 一般为单相交流输入, 而目前国内对电动汽车充电谐波问题的研究则主要集中在采用大功率地面直流充电机的充电站上。文献[7]根据某一型号的充电机参数建立了充电机(站)的 MATLAB 仿真模型, 对不同数量充电机接入电力系统的谐波进行了仿真分析预测。文献[8]分析了不同结构充电机对电网的 5、7 次谐波电流影响, 提出了电动汽车充电站电能质量在线监测及谐波治理方案。文献[9]利用电磁暂态仿真工具 PSCAD/EMTDC 搭建了 3 种充电机仿真模型, 主要对含不同整流结构的充电机接入电力系统谐波进行了分析和比较, 并研究了多台充电机不同时投入对系统的谐波影响。文献[10]建立了单个充电机的谐波分析数学模型, 利用概率统计学大数定律和中心极限定律, 进一步建立多谐波源谐波分析模型, 研究多个充电机产生的谐波电流及概率特性。文献[11]建立了充电机的动态线性小信号模型, 研究输入电压、充电电流、输出滤波器等参数与充电机环路特性的关系, 以期对充电机的控制环路设计提供依据, 但并未涉及充电机谐波特性的分析。综上, 现有研究多基于直流充电机及充电站, 缺少针对大规模车载充电机接入住宅区配电网的谐波分析,

收稿日期: 2013-06-24; 修回日期: 2013-12-17

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(61034007); 国家自然科学基金资助项目(61104034, 61273097); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20120131130007)

Project supported by the Key Program of National Natural Science Foundation of China(61034007), the National Natural Science Foundation of China(61104034, 61273097) and the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education(20120131130007)

Optimal time-of-use price model considering satisfaction degree of electric vehicle owners

GAO Yajing¹, WANG Chen², LÜ Mengkuo¹, LIANG Haifeng¹

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 2. China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Shenzhen 518124, China)

Abstract: The random charging model and V2G(Vehicle to Grid) discharging model of EV(Electric Vehicle) are analyzed and the demand response model of EV owners to price variation is built. An optimal TOU(Time-Of-Use) price scheme is proposed to influence the charging/discharging behaviour of EV owners, which balances between the profit of grid and the EV owners' profit and satisfaction. Case verification shows that, the optimal TOU price obtained from the proposed scheme guides effectively the EVs charging in valley period and discharging in peak period, taking care of EV owners' satisfaction while improving load curve.

Key words: electric vehicles; V2G; time-of-use price; satisfaction degree; models