

考虑用户参与度的电动汽车能效电厂模型

王明深¹, 于 汀², 穆云飞¹, 贾宏杰¹, 魏 炜¹, 蒲天骄², 张亚朋¹

(1. 天津大学 智能电网教育部重点实验室, 天津 300072; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 为充分挖掘电动汽车集群的响应能力, 探究补偿电价对用户参与度的影响, 建立了考虑用户参与度的电动汽车能效电厂模型, 该模型能够为能效电厂参与电力市场交易机制提供模型基础。构建了可综合考虑有功和无功响应能力的单体电动汽车的车网互动(V2G)模型; 进而对电动汽车交通行为特性进行统计分析, 根据不同类型电动汽车的响应特性, 提出了考虑补偿电价的电动汽车用户参与度响应模型; 在此基础上建立了考虑用户参与度的电动汽车能效电厂模型, 定义了能效电厂有功和无功响应能力、储能能力、价格响应的成本函数, 为能效电厂参与市场环境下电网的调度控制提供关键的模型参数。利用典型算例验证了考虑用户参与度的电动汽车能效电厂模型的有效性, 仿真结果表明能效电厂的响应及储能能力具有时间分布特性, 而能效电厂的价格响应特性受补偿电价的影响。

关键词: 电动汽车; V2G; 能效电厂; 参与度; 价格响应; 响应能力; 模型

中图分类号: TM 761; U 469.72

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.11.032

0 引言

电动汽车 EV(Electric Vehicle)规模化普及是实现交通低碳化发展的重要途径, 在世界范围内受到广泛关注。根据工业和信息化部发布的电动汽车发展战略研究报告, 预计到 2030 年我国电动汽车保有量将达到 6000 万辆, 总耗电量高达 1.35×10^{11} kW·h, 预计约占全国用电量的 1.3%, 如此大规模的电动汽车接入, 电网某些薄弱环节可能会因此而不堪重负^[1-2]。

随着电力电子技术、现代控制及通信技术的发展, 电动汽车在车网互动 V2G(Vehicle-to-Grid)控制下可以看作是一种电力储能系统。电动汽车可改变其充电模式(如无序充电和智能充电等)以实现充电功率在时间尺度上的变换; 或在紧急情况下, 根据系统需求向系统反馈电能, 辅助系统运行^[3-4]。在 V2G 控制下, 电动汽车既可以作为系统负荷, 又可以作为储能设备或分布式电源, 成为协助系统运行的积极参与者^[5-7]。一天中, 大量车辆有较长的停车时间, 往往以慢充方式进行充电, 能够在该过程中进行充放电控制^[8-10], 因此, 本文主要针对工作用途的电动汽车展开研究, 该类型车辆出行规律明显。

各国学者已针对电动汽车接入电网展开了大量

研究。文献[11-12]在考虑用户出行习惯的基础上, 提出了电动汽车充电负荷预测模型; 文献[13]通过对电动汽车充电过程进行有效控制, 探索了电动汽车作为需求侧响应资源的可行性; 文献[14]构建了基于下垂控制的电动汽车 V2G 调频响应模型, 以提升系统的频率质量。上述文献利用电动汽车集群 EVA(EV Aggregator)的响应能力参与系统的有功调控, 尚未将 EVA 上升到能效电厂的概念, 而能效电厂作为一种需求侧资源, 具有规模大且容易操作的优势, 能够为电网提供常规电厂等价服务支撑。文献[15]验证了需求侧响应资源构建能效电厂的可能性和合理性; 文献[16]基于现代通信技术提出了电动汽车能效电厂 E-EPP(Efficient Power Plant of EVs)的基本构架, 能够实现对地理上分散的电动汽车进行集中管控; 文献[17]提出了基于蒙特卡洛方法的 EVA 有功响应能力评估方法; 文献[18]提出了针对电动汽车的价格响应模型, 分析了补偿电价对 EVA 有功响应能力的影响; 文献[19]分析了 EVA 的有功响应能力能够参与电力市场交易的可行性。当前研究主要针对电动汽车的有功功率进行调度控制, 而基于电力电子接口的充电桩能够为电网提供无功支持^[20], 文献[21-22]验证了电动汽车充电桩作为无功补偿装置的可行性, 能够根据需求调节与电网互动过程中的功率因数。

因此, EVA 能够作为能效电厂参与电网的调度控制, 然而, 目前的研究成果在以下 3 个方面需要进一步探究: 在评估 EVA 响应能力过程中, 忽略了电动汽车用户参与电网调度控制的意愿和调度电动汽车的成本; 电动汽车具有无功响应能力, 需要在保证有功充电的基础上提出针对 EVA 无功响应能力的

收稿日期: 2016-12-01; 修回日期: 2017-08-11

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2015AA050403); 国家自然科学基金资助项目(51307115, 51361130152); 国家电网公司主动配电系统前瞻技术研究资助项目(DZ71-15-004)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2015AA-050403), the National Natural Science Foundation of China(51307115, 51361130152) and the Prospective Research of State Grid Corporation of China on Active Distribution Networks(DZ71-15-004)

评估方法;针对 E-EPP 的概念,需要对能效电厂的关键参数进行更为全面且有效的定义,尤其是获取能效电厂出力的成本函数,对能效电厂参与电力市场交易具有重要的意义。

为此,在充分研究用户交通出行特征、电池约束条件等基础上,同时考虑补偿电价对用户参与度的影响,提出了 E-EPP 模型,该模型可将 EVA 看作一种能效电厂,并对能效电厂的参数进行定义,包括能效电厂有功和无功出力的上下边界、能效电厂的储能能力、能效电厂出力与补偿电价的关系、能效电厂价格响应的成本函数。该模型能够从能效电厂运营商的角度,为 E-EPP 参与电网的调度控制提供关键的模型参数,能够为能效电厂参与电力市场交易机制提供模型基础,促进 E-EPP 从概念提出到实际应用的实现。

1 E-EPP 实现框架

E-EPP 的实现框架如图 1 所示,图中 CMP 表示充电管理系统。

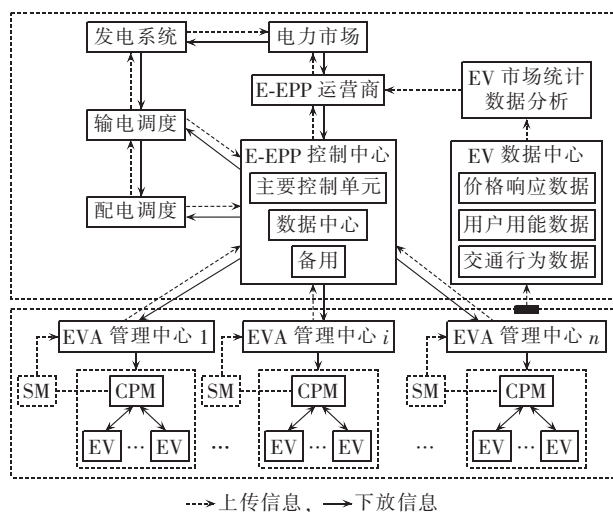


图 1 E-EPP 实现框架图

Fig.1 Implementation framework of E-EPP

E-EPP 运营商是实现 E-EPP 参与电力市场的关键环节,也是实现与用户进行电力交易的重要环节,本文从 E-EPP 运营商的角度,对 E-EPP 的响应能力进行评估,对考虑用户参与度的能效电厂价格响应的成本进行研究。

E-EPP 运营商负责对所管辖范围内的充电设备、信息采集设备、数据服务器、通信设备等进行统一的管理和维护,并与用户签订交易合同。运营商根据电网实时电价和充电需求强弱,对电动汽车的充电电价进行日前规划,同时根据电动汽车市场的统计数据,对用户参与电网响应的补偿电价进行设置,从而影响用户参与电网调控的意愿,达到管控电动汽车充放电行为的目的。

E-EPP 控制中心是实现各个能效电厂协调控制的核心单元,负责对各个能效电厂上传的数据进行存储和处理,根据补偿电价和交易合同的内容,确定能够参与市场交易的电动汽车,并向各个 EVA 控制中心发出控制命令。

EVA 控制中心对单个 E-EPP 进行直接管理和控制,借助智能量测单元 SM(Smart Meter)对电动汽车接入电网的状态数据进行采集、存储,并能够根据上层的控制命令,对所管辖区域内的电动汽车充放电过程进行调度和控制,并计算用户在整个接入过程中的成本和收益。

2 单体电动汽车 V2G 模型

本文主要针对以分布式充电桩进行常规慢速充电的电动汽车,建立其 V2G 模型。

电动汽车在接入电网的过程中,在保证用户出行舒适度的基础上,能够灵活变换其接入状态,如充/放电、吸收/发出无功等^[23-26]。从功率的角度,单体电动汽车 V2G 运行区域如图 2 所示,区域 I 为放电,发出无功;区域 II 为充电,发出无功;区域 III 为充电,吸收无功;区域 IV 为放电,吸收无功。图中,以放电(发出无功)为正方向, $P_{i,0}$ 和 $Q_{i,0}$ 分别为电动汽车 i 接入电网后的额定有功和无功功率; $S_{i,0}$ 为电动汽车的额定视在容量,满足 $S_{i,0} = P_{i,0} = Q_{i,0}$; $P_i(t)$ 、 $Q_i(t)$ 和 $S_i(t)$ 分别为 t 时刻电动汽车与电网交换的有功、无功和视在功率,满足约束条件 $|P_i(t)| \leq P_{i,0}$ 、 $|Q_i(t)| \leq Q_{i,0}$ 、 $|S_i(t)| = \sqrt{P_i^2(t) + Q_i^2(t)} \leq S_{i,0}$ 。

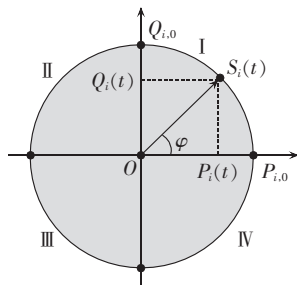


图 2 单体电动汽车 V2G 运行区域(功率角度)

Fig.2 Operation area of V2G for individual EV(perspective of power)

从能量累积角度,单体电动汽车 V2G 运行区域如图 3 所示。为防止电动汽车在 V2G 过程中充电或放电过度, $[SOC_i, \overline{SOC}_i]$ 为电动汽车 i 的荷电状态(SOC)上下限范围; $SOC_{i,s}$ 为电动汽车 i 出行结束后,接入电网时的初始 SOC 值; $SOC_{i,d}$ 为用户出行前对电池 SOC 的需求; $t_{i,s}$ 为电动汽车 i 接入电网的时间; $t_{i,d}$ 为电动汽车 i 离开电网并开始出行的时间。为获取最大 V2G 可控区域,假设电动汽车 i 接入电网后立即以额定有功功率进行充电,如图中 ab 段所示,直到

电动汽车 SOC 达到其上限值 $\overline{\text{SOC}}_i$;假设电动汽车 i 接入电网后立即以额定有功功率进行放电,如图中 ad 段所示,直到电动汽车 SOC 达到其下限值 $\underline{\text{SOC}}_i$;为保证电动汽车离开电网时($t_{i,d}$ 时刻),其 SOC 能够满足用户需求,即保证 SOC 不低于 $\text{SOC}_{i,d}$, ef 段为强制充电过程。

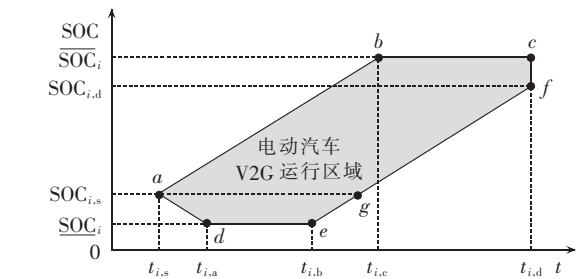


图 3 单体电动汽车 V2G 运行区域(能量角度)
Fig.3 Operation area of V2G for individual EV(perspective of energy)

电动汽车接入电网过程中,以放电为正方向,电动汽车 i 的 SOC 变化如式(1)所示。

$$\text{SOC}_i(t+\Delta t)=\text{SOC}_i(t)-\frac{P_i(t)\cdot\Delta t}{D_i^r(t)} \tag{1}$$

其中, $\text{SOC}_i(t)$ 为 t 时刻电动汽车的 SOC 值; Δt 为仿真时间间隔; $P_i(t)$ 为 t 时刻电动汽车与电网交换的有功功率; $D_i^r(t)$ 为 t 时刻修正后电动汽车的电池容量,如式(2)所示。

$$D_i^r(t)=\begin{cases} D_i/\eta_i^d & P_i(t)>0, \text{放电} \\ D_i & P_i(t)=0, \text{空闲} \\ D_i\eta_i^c & P_i(t)<0, \text{充电} \end{cases} \tag{2}$$

其中, D_i 为电动汽车的实际电池容量; η_i^c 和 η_i^d 分别为电动汽车的充电和放电效率。

在接入电网过程中,电动汽车有功功率上、下限($\overline{P}_i(t)$ 、 $\underline{P}_i(t)$)和无功功率上、下限($\overline{Q}_i(t)$ 、 $\underline{Q}_i(t)$)分别如式(3)和式(4)所示。

$$\begin{cases} \overline{P}_i(t)=P_{i,0}, \underline{P}_i(t)=-P_{i,0} & t\in[t_{i,s},t_{i,d}] \\ \overline{P}_i(t)=0, \underline{P}_i(t)=0 & t\notin[t_{i,s},t_{i,d}] \end{cases} \tag{3}$$

$$\begin{cases} \overline{Q}_i(t)=Q_{i,0}, \underline{Q}_i(t)=-Q_{i,0} & t\in[t_{i,s},t_{i,d}] \\ \overline{Q}_i(t)=0, \underline{Q}_i(t)=0 & t\notin[t_{i,s},t_{i,d}] \end{cases} \tag{4}$$

为了更加详细地说明单体电动汽车在接入电网时的响应能力,结合图 2 和图 3,电动汽车 i 在接入电网过程中,各时刻有功功率上、下限和无功功率上、下限如表 1 所示。

3 电动汽车参与度响应模型

3.1 电动汽车交通行为特征

本文主要是针对工作用途的电动汽车,该类型车辆的出行特征具有明显的规律性,如图 4 所示,该类型车辆在一天中的上午和下午各有一次出行时段,

表 1 电动汽车有功/无功功率上、下限
Table 1 Upper and lower boundaries of EV's active/reactive power

上、下限	区域内阴影区	区域边界				
		ab 段	bc 段	ad 段	de 段	ef 段
$\underline{P}_i(t)$	$-P_{i,0}$	$-P_{i,0}$	0	$-P_{i,0}$	$-P_{i,0}$	$P_{i,0}$
$\overline{P}_i(t)$	$P_{i,0}$	$P_{i,0}$	$P_{i,0}$	$P_{i,0}$	0	$P_{i,0}$
$\underline{Q}_i(t)$	$-Q_{i,0}$	$-Q_{i,0}$	$-Q_{i,0}$	$-Q_{i,0}$	$-Q_{i,0}$	0
$\overline{Q}_i(t)$	$Q_{i,0}$	$Q_{i,0}$	$Q_{i,0}$	$Q_{i,0}$	$Q_{i,0}$	0

即上班途中和下班途中,而其他时段都接入电网进行充电。根据该类型车辆所具有的行为特性,可以将电动汽车的充电场所分为工作区和住宅区。上班时间该类型电动汽车在工作区接入电网进行充电,其接入电网时间在 06:00—09:30 时段内服从如图 5 (a)所示的概率分布;下班后该类型电动汽车则在住宅区接入电网进行充电,其接入电网时间在 16:15—19:45 时段内服从如图 5(b)所示的概率分布^[27]。概率分布所服从的数学表达式如式(5)所示。

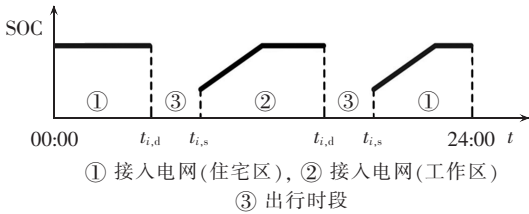


图 4 电动汽车出行特征
Fig.4 Travelling characteristic of EV

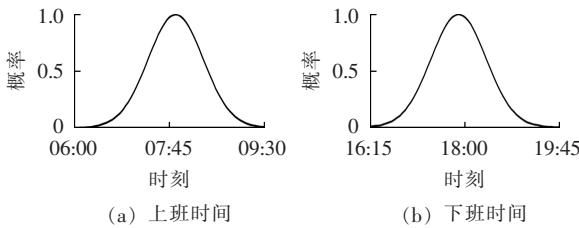


图 5 电动汽车接入电网时刻分布
Fig.5 Distribution of integrating time of EVs

$$\begin{cases} f(t_{i,s};\mu_s,\sigma_s)=\begin{cases} 0 & -\infty< t_{i,s}< t_{i,s}^{\min} \text{ 或 } t_{i,s}^{\max}< t_{i,s}< +\infty \\ \frac{f_0(t_{i,s};\mu_s,\sigma_s)}{\int_{t_{i,s}^{\min}}^{t_{i,s}^{\max}} f_0(t_{i,s};\mu_s,\sigma_s)dt} & t_{i,s}^{\min}\leq t_{i,s}\leq t_{i,s}^{\max} \end{cases} \\ f_0(t_{i,s};\mu_s,\sigma_s)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_s}\exp\left(-\frac{t_{i,s}-\mu_s}{2\sigma_s^2}\right) \end{cases} \tag{5}$$

其中, $[t_{i,s}^{\min},t_{i,s}^{\max}]$ 为上班或下班时段电动汽车接入电网时间的取值范围;针对上班的电动汽车,其接入电网时间的平均值 $\mu_s=7.87$ h,标准差 $\sigma_s=0.50$ h,取值范围为 $[6.25,9.50]$ h;而对于下班的电动汽车,其接入电网时间的平均值 $\mu_s=17.88$ h,标准差 $\sigma_s=0.51$ h,取值范围为 $[16.25,19.75]$ h。

电动汽车在接入电网前,其 SOC 值与行驶距离相关,可根据式(6)获得。

$$\text{SOC}_{i,s} = \delta_i - \frac{d_i}{d_{i,\max}} \quad (6)$$

其中, d_i 为电动汽车接入电网前的行驶距离; $d_{i,\max}$ 为电动汽车满充状态下的最大行驶距离; δ_i 为电动汽车满充状态下的 SOC 值, $0.8 \leq \delta_i \leq 0.9$ 。

3.2 电动汽车参与度响应模型

为了构建电动汽车的参与度响应模型, 本节提出了电动汽车参与度的概念, 即表征电动汽车用户在补偿机制下参与电网响应的意愿。根据电动汽车接入电网的状态(充电、空闲、放电), 本文定义了电动汽车的 2 种响应方式: 充电 $\rightarrow$ 空闲、空闲 $\rightarrow$ 放电。2 种响应方式均以增加对电网的功率输出为目的。考虑到不同响应方式下补偿机制的差异性, 同时为了降低建模过程的复杂度, 假设电动汽车不允许直接从充电状态转换为放电状态, 而电动汽车由充电状态转换为放电状态, 则通过“充电 $\rightarrow$ 空闲 $\rightarrow$ 放电”的过程来实现。

根据电动汽车的响应特性, 研究不同响应方式下电动汽车对补偿电价的响应, 是构建参与度响应模型的关键步骤。在充电过程中, 随着补偿电价的提高, 电动汽车用户的充电需求会减少(充电 $\rightarrow$ 空闲); 而在放电过程中, 随着补偿电价的提高, 电动汽车用户的放电需求会增加(空闲 $\rightarrow$ 放电)。在考虑文献[28]中价格对电力需求响应影响的基础上, 参考所提出的电动汽车的不同响应方式, 将补偿电价对电动汽车功率的影响定义为弹性系数, 如式(7)所示。

$$\varepsilon_{k,\text{ev}} = \frac{\Delta P_{k,\text{ev}} / P_{k,\text{ev}}}{\Delta \rho_{k,\text{ev}} / \rho_{k,\text{ev}}} \quad (7)$$

其中, $\Delta P_{k,\text{ev}}$ 和 $\Delta \rho_{k,\text{ev}}$ 分别为 k 响应方式下电动汽车功率和补偿电价的变化量; k 取值 1、2, 分别代表电动汽车“充电 $\rightarrow$ 空闲”、“空闲 $\rightarrow$ 放电”响应方式; $P_{k,\text{ev}}$ 和 $\rho_{k,\text{ev}}$ 分别为 k 响应方式下电动汽车功率和补偿电价的基准值。

在考虑不同响应方式差异性的基础上, 同时兼顾电动汽车响应对补偿电价的敏感程度, 结合文献[29]中价格型需求响应与电价的关系, 如式(8)所示。

$$P_{k,\text{ev}} = a_{k,\text{ev}} \rho_{k,\text{ev}} + b_{k,\text{ev}} \quad P_{k,\text{ev}} \in [\underline{P}_{k,\text{ev}}, \bar{P}_{k,\text{ev}}] \quad (8)$$

其中, $a_{k,\text{ev}}$ 和 $b_{k,\text{ev}}$ 为 k 响应方式下的价格关系系数; $\bar{P}_{k,\text{ev}}$ 和 $\underline{P}_{k,\text{ev}}$ 分别为 k 响应方式下电动汽车有功输出的上、下限。

在此基础上, 为定义电动汽车参与度的数学模型, 在不同响应方式下, 电动汽车参与度与补偿电价的关系如式(9)所示。

$$\gamma_{k,\text{ev}} = \frac{P_{k,\text{ev}} - \underline{P}_{k,\text{ev}}}{\bar{P}_{k,\text{ev}} - \underline{P}_{k,\text{ev}}} = \frac{(a_{k,\text{ev}} \rho_{k,\text{ev}} + b_{k,\text{ev}}) - \underline{P}_{k,\text{ev}}}{\bar{P}_{k,\text{ev}} - \underline{P}_{k,\text{ev}}} = \frac{a_{k,\text{ev}}}{\bar{P}_{k,\text{ev}}} \rho_{k,\text{ev}} + \frac{b_{k,\text{ev}} - \underline{P}_{k,\text{ev}}}{\bar{P}_{k,\text{ev}}} = \alpha_{k,\text{ev}} \rho_{k,\text{ev}} + \beta_{k,\text{ev}} \quad (9)$$

其中, $\gamma_{k,\text{ev}}$ 为 k 响应方式下电动汽车的参与度; $\alpha_{k,\text{ev}}$ 和 $\beta_{k,\text{ev}}$ 为参与度价格响应的关系系数。

以峰谷分时充电电价为研究背景, 假设用户在充电前已设定好离开电网的时间, 本文将工作用途的电动汽车按照响应方式的差异性分为 A、B、C 3 种类型。

a. A 类型电动汽车。

在峰谷分时电价实施后, A 类型电动汽车不改变其充电时间, 即接入电网后立刻以额定功率进行充电且不参与 V2G 过程, 该类型电动汽车对补偿电价无任何响应, 可以看作不可控负荷。

以该类型的电动汽车 i 为例, 其充电时长 T_i^A 如式(10)所示, 充电的成本费用如式(11)所示。

$$T_i^A = \frac{\text{SOC}_i^A - \text{SOC}_{i,s}^A}{P_{i,0}^A(t)} \quad (10)$$

$$\begin{cases} F_i^A = \sum_{t=t_{i,s}^A}^{t_{i,s}^A + T_i^A} [\rho(t) \cdot (-P_i^A(t)) \cdot \Delta t] \\ P_i^A(t) = -P_{i,0}^A \end{cases} \quad (11)$$

其中, 为了区分不同类型的电动汽车, 本文变量的上标 A、B、C 代表不同类型的电动汽车; $\rho(t)$ 为实时充电电价; $t_{i,s}^A + T_i^A$ 为充满电的时刻。

对于该类型 EVA, 不同响应方式下的响应能力如式(12)和式(13)所示。

$$P_{1,\text{ev}}^A = \underline{P}_{1,\text{ev}}^A = \bar{P}_{1,\text{ev}}^A = 0 \quad (12)$$

$$P_{2,\text{ev}}^A = \underline{P}_{2,\text{ev}}^A = \bar{P}_{2,\text{ev}}^A = 0 \quad (13)$$

由于该类型电动汽车对补偿电价无任何响应, 其充电过程可参照图 3 中的运行区域 abc , 根据式(9)、(12)和(13)易知, 该类型电动汽车在各响应方式下的参与度均为 0, 即 $\gamma_{1,\text{ev}}^A = 0$ 、 $\gamma_{2,\text{ev}}^A = 0$ 。在不影响充电的情况下, 电动汽车能够为电网提供无功支撑, 因此该类型电动汽车的作用是仅能够在空闲时为电网提供无功支撑。

b. B 类型电动汽车。

在峰谷分时充电电价实施后, B 类型电动汽车改变其充电时间, 以接入电网时段内用户的充电成本最低来规划充电时间, 即转移充电负荷至电价较低的时段。在不增加用户充电成本的基础上, 该类型电动汽车可以实现“充电 $\rightarrow$ 空闲”的响应方式, 该响应方式延长了用户的充电时间, 因此需要对用户延长的充电时间进行补偿, 该类型电动汽车不参与 V2G 放电过程。

以该类型的电动汽车 i 为例, 其规划的充电过程满足成本费用最低, 同时要满足 SOC 状态约束、充电约束以及充电功率约束, 如式(14)所示。在考虑补偿电价后, 由于延长了充电时间, 需要对延长时段内

的电动汽车充电过程进行补偿,其充电的成本费用(包括充电成本和补偿收益)如式(15)所示。

$$\begin{cases} \min F_{i,0}^B = \sum_{t=t_{i,0}^B}^{t_{i,d}^B} [\rho(t) \cdot (-P_i^B(t)) \cdot \Delta t] \\ \text{s.t. } \text{SOC}_i^B(t+\Delta t) = \text{SOC}_i^B(t) + (-P_i^B(t)) \cdot \Delta t \\ \sum_{t=t_{i,0}^B}^{t_{i,d}^B} [(-P_i^B(t)) \cdot \Delta t] + \text{SOC}_{i,s}^B = \overline{\text{SOC}}_i^B \\ P_i^B(t) \in \{0, -P_{i,0}^B\} \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} F_{i,1}^B = \sum_{t=t_{i,0}^B}^{t_{i,d}^B} [(\rho(t) - \rho_{i,ev}^B(t)) \cdot (-P_i^B(t)) \cdot \Delta t] \\ P_i^B(t) \in \{0, -P_{i,0}^B\} \end{cases} \quad (15)$$

对于该类型 EVA,不同响应方式下的响应能力如式(16)和式(17)所示。

$$\begin{cases} P_{1,ev}^B = \sum_{i=1}^{n_1^B(t)} P_i^B \\ \underline{P}_{1,ev}^B = \sum_{i=1}^{n_1^B(t)} \underline{P}_i^B, \quad \overline{P}_{1,ev}^B = 0 \end{cases} \quad (16)$$

$$P_{2,ev}^B = \underline{P}_{2,ev}^B = \overline{P}_{2,ev}^B = 0 \quad (17)$$

其中, $n_1^B(t)$ 为 t 时刻能够实现“充电→空闲”响应方式的电动汽车数量。

由于该类型电动汽车不考虑 V2G 放电过程,其充电过程可参照图 3 中的运行区域 $abcfg$, 根据式(9)、(16)和(17)易知,该类型电动汽车的参与度满足 $0 \leq \gamma_{1,ev}^B \leq 1$ 和 $\gamma_{2,ev}^B = 0$ 。

c. C 类型电动汽车

在峰谷分时电价实施后,C 类型电动汽车能够以充电成本最低进行充电,而在补偿电价的刺激下能够改变其接入电网的状态,从而参与 V2G 过程(充电→空闲、空闲→放电)。

以该类型的电动汽车 i 为例,其规划的充电过程同样需满足成本费用最低,类似式(14),将 B 改为 C 即可。在考虑补偿电价后,其充电的成本费用(包括充电成本和补偿收益)如式(18)所示。

$$\begin{cases} F_{i,1}^C = \sum_{t=t_{i,0}^C}^{t_{i,d}^C} [(\rho(t) - \rho_{i,ev}^C(t)) \cdot (-P_i^C(t)) \cdot \Delta t] \\ P_i^C(t) \in \{0, -P_{i,0}^C, P_{i,0}^C\} \end{cases} \quad (18)$$

对于该类型 EVA,不同响应方式下的响应能力如式(19)和式(20)所示。

$$\begin{cases} P_{1,ev}^C = \sum_{i=1}^{n_1^C(t)} P_i^C \\ \underline{P}_{1,ev}^C = \sum_{i=1}^{n_1^C(t)} \underline{P}_i^C, \quad \overline{P}_{1,ev}^C = 0 \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} P_{2,ev}^C = \sum_{i=1}^{n_2^C(t)} P_i^C \\ \underline{P}_{2,ev}^C = 0, \quad \overline{P}_{2,ev}^C = \sum_{i=1}^{n_2^C(t)} \overline{P}_i^C \end{cases} \quad (20)$$

其中, $n_1^C(t)$ 、 $n_2^C(t)$ 分别为 t 时刻能够实现“充电→空闲”、“空闲→放电”响应方式的电动汽车数量。

由于该类型电动汽车考虑其 V2G 过程,其充电

过程可参照图 3 中的运行区域 $abcfed$, 根据式(9)、(19)和(20)易知,该类型电动汽车的参与度满足 $0 \leq \gamma_{1,ev}^C \leq 1$ 和 $0 \leq \gamma_{2,ev}^C \leq 1$ 。

4 E-EPP 模型

本节在单体电动汽车 V2G 模型和参与度响应模型的基础上,针对 EVA,构建了 E-EPP 模型,并定义了能效电厂模型参数,将 EVA 等效为能效电厂,该能效电厂模型能够评估 EVA 的响应能力、储能能力、价格响应的成本,为 EVA 参与电力市场提供模型参考。

4.1 E-EPP 响应能力

为评估 EVA 的响应能力,本文定义了 E-EPP 的出力范围,包括各时刻能效电厂的实际有功出力值(如式(21)所示)、最小和最大有功出力值(如式(22)所示);电动汽车无功出力与电动汽车类型无关,本文中无功仅作为服务商的辅助服务,在不影响单体电动汽车有功出力的前提下,同时满足充电桩的容量约束,能效电厂无功出力的最小和最大值如式(23)所示。

$$P_{ev}(t) = P_{1,ev}^B + P_{1,ev}^C(t) + P_{2,ev}^C(t) \quad (21)$$

$$\begin{cases} \underline{P}_{ev}(t) = \underline{P}_{1,ev}^B + \underline{P}_{1,ev}^C(t) + \underline{P}_{2,ev}^C(t) \\ \overline{P}_{ev}(t) = \overline{P}_{1,ev}^B + \overline{P}_{1,ev}^C(t) + \overline{P}_{2,ev}^C(t) \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} \underline{Q}_{ev}(t) = \sum_{i=1}^{n(t)} \underline{Q}_i(t) \\ \overline{Q}_{ev}(t) = \sum_{i=1}^{n(t)} \overline{Q}_i(t) \end{cases} \quad (23)$$

其中, $n(t)$ 为 t 时刻 EVA 中电动汽车接入电网的数量。

4.2 E-EPP 储能能力

为评估 EVA 的储能能力,本文定义了各时刻能效电厂的储能能力,由于仅有 C 类型的电动汽车能够将储存在电池中的能量以 V2G 放电的形式来响应电网的需求,因此,能效电厂的储能能力主要是针对 C 类型的电动汽车。本文定义了 EVA 的储能容量,如式(24)所示;定义了 EVA 的 SOC 值,如式(25)所示。

$$D_{ev}(t) = \sum_{i=1}^{n_2^C(t)} [D_i^C(t) \cdot (\overline{\text{SOC}}_i^C(t) - \underline{\text{SOC}}_i^C(t))] \quad (24)$$

$$\text{SOC}_{ev}(t) = \frac{\sum_{i=1}^{n_2^C(t)} [D_i^C(t) \cdot (\text{SOC}_i^C(t) - \underline{\text{SOC}}_i^C(t))]}{D_{ev}(t)} \quad (25)$$

4.3 考虑参与度的 E-EPP 价格响应

为评估 EVA 的价格响应特性,在考虑参与度响应模型的基础上,根据式(9)中参与度 $\gamma_{k,ev}$ 和补偿电价 $\rho_{k,ev}$ 的关系,“充电→空闲”响应方式在补偿电价为 $\rho_{1,ev}$ 时的参与度为 $\gamma_{1,ev}$,”空闲→放电”响应方式在补偿电价为 $\rho_{2,ev}$ 时的参与度为 $\gamma_{2,ev}$,如式(26)所示。在考虑用户参与度后,能效电厂的有功出力变

化 $\Delta\rho_{ev}$ 受参与度的响应,如式(27)所示,结合参与度和补偿电价的关系,获取电动汽车出力受补偿电价影响的价格响应曲线。

$$\begin{cases} \gamma_{1, ev} = \alpha_{1, ev} \rho_{1, ev} + \beta_{1, ev} \\ \gamma_{2, ev} = \alpha_{2, ev} \rho_{2, ev} + \beta_{2, ev} \end{cases} \quad (26)$$

$$\Delta P_{ev} = \sum_{i=1}^{\gamma_{1, ev} \cdot n_1^B(t)} (0 - \underline{P}_i^B(t)) + \sum_{i=1}^{\gamma_{1, ev} \cdot n_1^C(t)} (0 - \underline{P}_i^C(t)) + \sum_{i=1}^{\gamma_{2, ev} \cdot n_2^C(t)} (\bar{P}_i^C(t) - 0) \quad (27)$$

考虑到 ΔP_{ev} 是补偿电价 ρ_{ev} 和时间 t 的函数,如式(28)所示,而 ρ_{ev} 和 t 是相互独立的变量,可以获得 ρ_{ev} 受 ΔP_{ev} 和 t 影响的函数关系,如式(29)所示。在式(29)的基础上,以 t_0 时刻为例,以 ΔP_{ev} 为变量对 ρ_{ev} 进行积分,如式(30)所示,可得 E-EPP 价格响应的成本函数。

$$\Delta P_{ev} = f(\rho_{ev}, t) \quad (28)$$

$$\rho_{ev} = f^{-1}(\Delta P_{ev}, t) \quad (29)$$

$$F(\Delta P_{ev}, t_0) = \int_0^{\Delta P_{ev}} \rho_{ev} d\Delta P_{ev} = \int_0^{\Delta P_{ev}} f^{-1}(\Delta P_{ev}, t_0) d\Delta P_{ev} \quad (30)$$

5 算例分析

5.1 算例数据

算例主要考虑工作用途的电动汽车,根据该类型电动汽车的工作特性,将配电网分为工作区和住宅区,对一天中配电网区域中电动汽车的响应能力进行评估,电动汽车的数据如下所示。

a. 配电网区域中电动汽车数量为 324 辆,其中 A、B、C 3 种类型的电动汽车所占的比例分别为 0.2、0.3、0.5,所有车辆均按照图 5 中所示的概率分布接入电网进行充电。

b. 电动汽车充放电功率的额定值为 7 kW,充放电的效率均为 0.90^[30]。

c. 电动汽车的电池容量为 35 kW·h,其接入电网时的 SOC 值服从 $N(0.6, 0.1)$ 的正态分布,电动汽车离开电网时的 SOC 值服从 $[0.8, 0.9]$ 的均匀分布^[31]。

d. 电动汽车的充电采用公共充电设施执行的峰谷分时充电电价^[27],如表 2 所示。

表 2 电动汽车的充电电价
Table 2 Charging price for EVs

分类	时段	电价/[元·(kW·h) ⁻¹]
峰时段	08:00—12:00, 17:00—21:00	1.082
平时段	12:00—17:00, 21:00—24:00	0.649
谷时段	00:00—08:00	0.316

e. 电动汽车接入电网时间、离开电网时间、电池容量、接入电网时的 SOC 值、离开电网时的 SOC 值为相互独立的变量。

f. 电动汽车有“充电→空闲”和“空闲→放电”2 种响应方式,电动汽车不能由充电状态直接转换为放电状态。

g. 对于“充电→空闲”响应方式的电动汽车,参与度初始补偿电价为 0.1 元/(kW·h),参与度最高补偿电价为 0.5 元/(kW·h)^[29];考虑到电池的损耗并不长时间处于极端状态,对于“空闲→放电”响应方式的电动汽车,参与度初始补偿电价为 0.5 元/(kW·h)^[27],参与度最高补偿电价为 1.082 元/(kW·h)。

本文采用 MATLAB R2013b 对研究工作进行建模及仿真研究,根据统计数据的概率分布特性,本文利用蒙特卡洛抽样方法对单体电动汽车模型参数进行抽样,包括电动汽车接入电网的时间、接入和离开电网前的 SOC 值、用户出行需求等参数,构建 E-EPP 模型,评估 EVA 响应能力、储能能力、价格响应的成本等,仿真时间为 10.786 s。

5.2 E-EPP 响应特性

为了详细说明 E-EPP 的响应特性,图 6 给出了 A、B、C 3 种类型电动汽车的充电负荷以及峰谷分时电价,可以看出, A 类型电动汽车的充电过程不受电价的影响,而 B 和 C 类型的电动汽车避开峰时电价选择在价格较低的谷时段和平时段进行充电,以最小化充电的成本费用。电动汽车在一天中的充电费用的概率分布如图 7 所示, B 和 C 类型电动汽车的充电成本大幅低于 A 类型电动汽车, A 类型车辆一天的平均充电费用为 18.7 元,而 B、C 类型电动汽车一天的平均充电费用仅为 8.3 元。

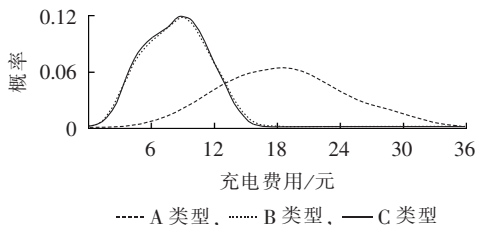
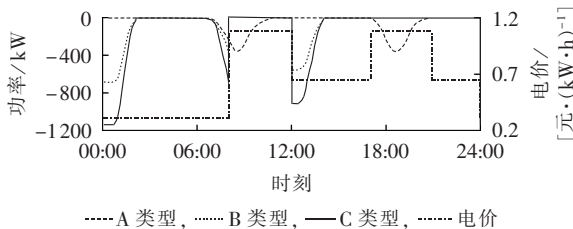


图 7 3 种类型电动汽车充电费用的概率分布
Fig.7 Distribution of charging cost for three kinds of EVs

针对不同类型的电动汽车,在不同响应方式下有功响应能力的上、下边界如图 8 所示,可以看出电动汽车的响应能力具有时间分布特性,能够获取不

同时刻电动汽车所能提供的最大响应能力,为运营商参与电力市场提供详细的响应能力参考。图 8(a)对应式(16),其响应能力主要来自 B 类型车辆“充电→空闲”响应方式;图 8(b)对应式(19),其响应能力主要来自 C 类型车辆“充电→空闲”响应方式,图 8(c)对应式(20),其响应能力主要来自 C 类型车辆“空闲→放电”响应方式,图 8(d)对应式(22),是 B、C 类电动汽车响应能力之和。

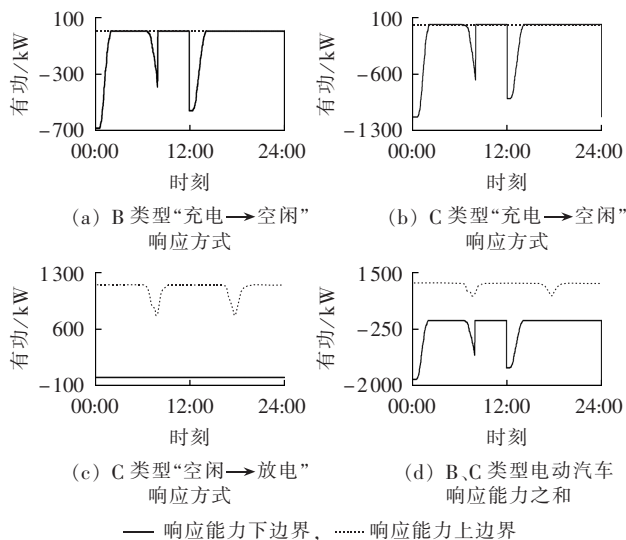


图 8 E-EPP 有功响应能力

Fig.8 Active power response capacity of E-EPP

考虑到 A、B、C 3 种类型电动汽车的无功响应能力,能效电厂在一天中各时刻的无功响应能力如图 9 所示。对应式(23),通过获取能效电厂的无功响应能力,能够为电动汽车运营商提供无功响应能力的边界信息,运营商与电网公司签署的交易合同加入无功服务条款,在同等报价(有功功率服务)的前提下,该条款会提升电网公司选择该运营商意愿,在参与电网有功调度的同时,为电网提供无功功率,实现无功的就地补偿,改善配电网的电压水平。

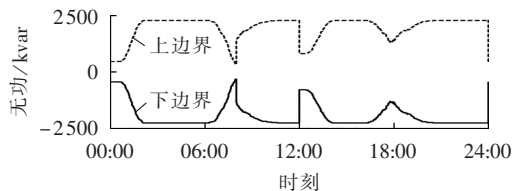


图 9 E-EPP 无功响应能力

Fig.9 Reactive power response capacity of E-EPP

根据第 4 节中对 E-EPP 储能能力的定义,能效电厂在一天中各时刻的储能能力如图 10 所示,能够为电动汽车运营商提供能效电厂在各时刻的储能容量值。在考虑电动汽车电池充放电约束的情况下,图 10 中给出了能效电厂在各时刻可用的储能总容

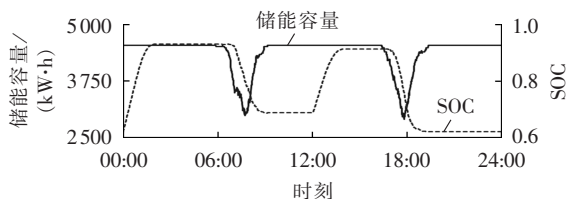


图 10 E-EPP 储能能力

Fig.10 Storage capability of E-EPP

量(对应式(24))和 SOC 值(对应式(25)),在任一时刻,图中储能容量和 SOC 值的乘积即为当前时刻能效电厂的储能值。

5.3 考虑参与度的 E-EPP 价格响应

在对 E-EPP 响应能力进行评估的基础上,考虑补偿电价对用户参与调度控制的激励作用,本文研究用户参与度对能效电厂实际出力的影响。根据第 4 节提出的考虑用户参与度的 E-EPP 价格响应模型,在考虑电动汽车不同类型、不同响应方式的基础上,以 00:00、04:00、08:00 和 12:00 为例,图 11 给出了能效电厂出力受补偿电价的影响。

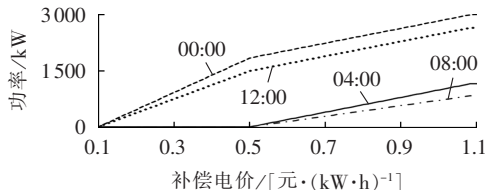


图 11 考虑补偿电价的 E-EPP 出力

Fig.11 Power output of E-EPP considering compensation price

根据 E-EPP 出力受补偿电价的影响情况,结合式(30),仍以 00:00、04:00、08:00 和 12:00 为例,图 12 给出了 E-EPP 价格响应的成本与出力大小的关系。

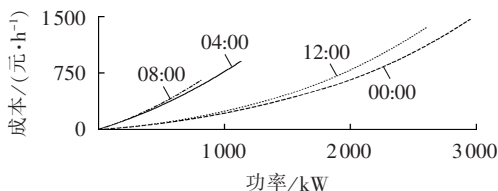


图 12 E-EPP 出力的成本曲线

Fig.12 Cost curves of power output of E-EPP

利用最小二乘法对各时刻 E-EPP 出力的成本曲线进行拟合,以 00:00 为例,并参考火力发电机的运行成本函数,拟合后的函数形式为 $F(\Delta P_{ev}) = a_0 \Delta P_{ev}^2 + b_0 \Delta P_{ev} + c_0$ [32],根据获得的二次多项式拟合结果,拟合前、后 E-EPP 价格响应的成本与出力大小的关系如图 13 所示。为进一步详细说明各时刻 E-EPP 出力与成本的关系,表 3 给出了各时刻二次多项式拟合后的参数结果以及响应能力的范围。

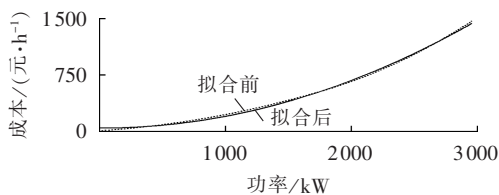


图 13 拟合后 E-EPP 出力的成本函数

Fig.13 Cost function of power output of E-EPP after fitting

表 3 拟合前、后 E-EPP 出力的成本曲线 (00:00)

Table 3 Cost curves of power output of E-EPP at 00:00 after fitting

时刻	$a_0/(\text{元}\cdot\text{kW}^{-2})$	$b_0/(\text{元}\cdot\text{kW}^{-1})$	$c_0/\text{元}$	最小出力/kW	最大出力/kW
00:00	1.624×10^{-4}	-0.00794	37.128	0	2947
01:00	1.840×10^{-4}	0.00601	28.355	0	2660
02:00	2.664×10^{-4}	0.459	-7.492	0	1197
03:00	2.566×10^{-4}	0.505	0.000167	0	1134
04:00	2.566×10^{-4}	0.505	0.000167	0	1134
05:00	2.566×10^{-4}	0.505	0.000167	0	1134
06:00	2.582×10^{-4}	0.505	0.000166	0	1127
07:00	3.333×10^{-4}	0.454	-6.528	0	966
08:00	3.553×10^{-4}	0.505	0.000121	0	819
09:00	2.582×10^{-4}	0.505	0.000166	0	1127
10:00	2.566×10^{-4}	0.505	0.000167	0	1134
11:00	2.566×10^{-4}	0.505	0.000167	0	1134
12:00	1.886×10^{-4}	0.00974	26.493	0	2604
13:00	2.316×10^{-4}	0.059	9.646	0	2149
14:00	2.608×10^{-4}	0.485	-3.676	0	1162
15:00	2.566×10^{-4}	0.505	0.000167	0	1134
16:00	2.566×10^{-4}	0.505	0.000167	0	1134
17:00	2.969×10^{-4}	0.505	0.000145	0	980
18:00	3.584×10^{-4}	0.505	0.000120	0	812
19:00	2.648×10^{-4}	0.505	0.000162	0	1099
20:00	2.566×10^{-4}	0.505	0.000167	0	1134
21:00	2.566×10^{-4}	0.505	0.000167	0	1134
22:00	2.566×10^{-4}	0.505	0.000167	0	1134
23:00	2.566×10^{-4}	0.505	0.000167	0	1134

6 结论

本文从 E-EPP 运营商的角度,针对工作用途的电动汽车,提出了考虑用户参与度的 E-EPP 模型,用来评估不同时刻 EVA 的响应能力、储能能力以及参与价格响应的成本函数,具体研究结论如下:

a. 在考虑不同类型电动汽车响应特性的基础上,所提出的能效电厂模型能够有效评估 EVA 的有功和无功响应能力、储能能力受出行时间和峰谷分时充电电价的影响,其响应能力和储能能力具有明显的时间分布特性;

b. 用户参与度主要是受补偿电价的直接影响,因此,E-EPP 的实际出力受补偿电价的影响,随着补偿电价的提高,用户的参与度增大,E-EPP 的出力也增加;

c. 在补偿电价的基础上,根据 E-EPP 价格响应

的成本函数,能够获取各时刻能效电厂出力的成本曲线,参考火力发电厂的成本函数,获取各时刻成本曲线拟合后的二次多项式系数,能够为能效电厂参与电力市场报价提供参考的成本曲线;

d. 区域中的 EVA 能够作为一个等效的能效电厂,根据每个能效电厂的参数,包括有功和无功响应能力、储能能力、成本函数,E-EPP 运营商能够参与电力市场竞争,考虑到当前时刻能效电厂的响应能力受上一时段是否参加电网响应的影响,同时结合电动汽车的快速响应能力,能效电厂更适用于参加现货市场交易。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] REZAEI S,FARJAH E,FARJAH B. Probabilistic analysis of plug-in electric vehicles impact on electrical grid through homes and parking lots[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013,4(4):1024-1033.
- [3] 吴凯,程启明,李明,等. 具有 V2G 功能的电动汽车快速充放电方法[J]. 电力自动化设备,2014,34(2):30-34.
WU Kai,CHENG Qiming,LI Ming,et al. Fast charging and discharging method for electric vehicle with V2G function[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(2):30-34.
- [4] 张颖达,刘念,张建华. 电动汽车换电站 V2G 运行对中压配电网故障特征的影响[J]. 电力自动化设备,2014,34(11):55-61.
ZHANG Yingda,LIU Nian,ZHANG Jianhua. Impact of battery swap station using V2G technology on fault characteristics of medium voltage distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(11):55-61.
- [5] MA Y,HOUGHTON T,CRUDEN A,et al. Modeling the benefits of vehicle-to-grid technology to a power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2012,27(2):1012-1020.
- [6] MU Y,WU J,EKANAYAKE J,et al. Primary frequency response from electric vehicles in the Great Britain power system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2013,4(2):1142-1050.
- [7] 陈思,张焰,薛贵挺,等. 考虑与电动汽车换电站互动的微电网经济调度[J]. 电力自动化设备,2015,35(4):60-69.
CHEN Si,ZHANG Yan,XUE Guiting,et al. Microgrid economic dispatch considering interaction with EV BSS[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(4):60-69.
- [8] 邵成成,王锡凡,王秀丽. 发电成本最小化的电动汽车分布式充放电控制[J]. 电力自动化设备,2014,34(11):22-40.
SHAO Chengcheng,WANG Xifan,WANG Xiuli. Coordinated charging and discharging of large-scale plug-in electric vehicles with cost and capacity benefit analysis[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(11):22-40.
- [9] 罗卓伟,胡泽春,宋永华,等. 大规模电动汽车充放电优化控制及容量效益分析[J]. 电力系统自动化,2012,36(10):19-26.

- LUO Zhuowei, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Coordinated charging and discharging of large-scale plug-in electric vehicles with cost and capacity benefit analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(10): 19-26.
- [10] 赵俊华, 文福拴, 薛禹胜, 等. 计及电动汽车和风电出力不确定性的随机经济调度[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(20): 22-29.
- ZHAO Junhua, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. Power system stochastic economic dispatch considering uncertain outputs from plug-in electric vehicles and wind generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(20): 22-29.
- [11] 刘鹏, 刘瑞叶, 白雪峰, 等. 基于扩散理论的电动汽车充电负荷模型[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(9): 30-34.
- LIU Peng, LIU Ruiye, BAI Xuefeng, et al. Charging load model based on diffusion theory for electric vehicles[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(9): 30-34.
- [12] 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.
- [13] 王锡凡, 邵成成, 王秀丽, 等. 电动汽车充电负荷与调度控制策略综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 1-10.
- WANG Xifan, SHAO Chengcheng, WANG Xiuli, et al. Survey of electric vehicle charging load and dispatch control strategies [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 1-10.
- [14] OTA Y, TANIGUCHI H, NAKAJIMA T, et al. Autonomous distributed V2G (Vehicle-to-Grid) satisfying scheduled charging [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1): 559-564.
- [15] 王丹, 范孟华, 贾宏杰. 考虑用户舒适约束的家居温控负荷需求响应和能效电厂建模[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(13): 2071-2077.
- WANG Dan, FAN Menghua, JIA Hongjie. User comfort constraint demand response for residential thermostatically-controlled loads and efficient power plant modeling[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(13): 2071-2077.
- [16] MARRA F, SACCHETTI D, PEDERSEN A B. Implementation of an electric vehicle test bed controlled by a virtual power plant for contributing to regulating power reserves[C]//Power and Energy Society General Meeting. San Diego, CA, USA: IEEE, 2012: 1-7.
- [17] WANG M, MU Y, JIA H, et al. Active power regulation for large-scale wind farms through an efficient power plant model of electric vehicles[J]. Applied Energy, 2017, 185: 1673-1683.
- [18] 王明深, 于汀, 穆云飞, 等. 电动汽车能效电厂价格响应模型[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2016, 49(12): 1320-1329.
- WANG Mingshen, YU Ting, MU Yunfei, et al. A price response model for efficient power plant of electric vehicles[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2016, 49(12): 1320-1329.
- [19] WU H, SHAHIDEHPOUR M, ALABDULWAHAB A, et al. A game theoretic approach to risk-based optimal bidding strategies for electric vehicle aggregators in electricity markets with variable wind energy resources[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(1): 374-385.
- [20] 楚皓翔, 解大, 姜宇成, 等. 电动汽车智能充放储一体化电站无功电压调控策略[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(11): 48-54.
- CHU Haoxiang, XIE Da, LOU Yucheng, et al. Strategy of reactive power and voltage control for integrated EV station of intelligent charging, discharging and storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(11): 48-54.
- [21] MOJDEHI M N, GHOSH P. Modeling and revenue estimation of EV as reactive power service provider[C]//PES General Meeting | Conference & Exposition. National Harbor, MD, USA: IEEE, 2014: 1-5.
- [22] 李付存. 电动汽车 V2G 技术及其充电机的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- LI Fucun. Research on V2G technology of electric vehicle and its charging system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [23] RABIEE A, FARAHANI HF, KHALILI M. Integration of plug-in electric vehicles into microgrids as energy and reactive power providers in market environment[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2016, 12(4): 1312-1320.
- [24] KISACIKOGLU M C, KESLER M, TOLBERT L M. Single-phase on-board bidirectional PEV charger for V2G reactive power operation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(2): 767-775.
- [25] KISACIKOGLU M C, OZPINECI B, TOLBERT L M. EV/PHEV bidirectional charger assessment for V2G reactive power operation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(12): 5717-5727.
- [26] KESLER M, KISACIKOGLU M C, TOLBERT L M. Vehicle-to-grid reactive power operation using plug-in electric vehicle bidirectional offboard charger[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(12): 6778-6784.
- [27] 潘樵惠, 高赐威, 刘顺桂. 基于需求侧放电竞价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.
- [28] 高亚静, 王辰, 吕孟抒, 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.
- [29] 曾丹, 姚建国, 杨胜春, 等. 应对风电消纳中基于安全约束的价格型需求响应优化调度建模[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5571-5578.
- ZENG Dan, YAO Jianguo, YANG Shengchun, et al. Optimization dispatch modeling for price-based demand response considering security constraints to accommodate the wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5571-5578.
- [30] 王龙. 电动汽车充放电对电网的影响及其优化策略研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- WANG Long. Research on the impacts of electric vehicles charging and discharging on the power system and its optimal strategy[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [31] MU Y, WU J, JENKINS N, et al. A spatial-temporal model for grid impact analysis of plug-in electric vehicle[J]. Applied

Energy, 2014, 114:456-465.

- [32] RAGLEND IJ, PADHY NP. Solutions to practical unit commitment problems with the operational, power flow and environmental constraints [C] // Power Engineering Society General Meeting. Montreal, Canada: IEEE, 2006: 1-8.

作者简介:

王明深(1990—), 男, 河北沧州人, 博士研究生, 研究方向为电力需求侧资源管理与优化调控(E-mail: wangmingshen@



王明深

tju.edu.cn);

穆云飞(1984—), 男, 河北石家庄人, 副教授, 博士, 主要研究方向为电力系统安全稳定性及新能源应用(E-mail: yunfeimu@tju.edu.cn);

贾宏杰(1973—), 男, 河北石家庄人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 主要研究方向为电力系统安全稳定(E-mail: hjjia@tju.edu.cn)。

Model of E-EPP considering participation factor of EV users

WANG Mingshen¹, YU Ting², MU Yunfei¹, JIA Hongjie¹, WEI Wei¹, PU Tianjiao², ZHANG Yapeng¹

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: In order to evaluate the response capability of EVA(Electric Vehicle Aggregator) and investigate the influence of the compensation price on the participation factor of EV(Electric Vehicle) users, the model of E-EPP(Efficient Power Plant model of EVs) considering the participation of EV users is established to provide the basis for E-EPP to participate in the electricity market. The V2G(Vehicle-to-Grid) model of individual EV considering the response capacity of both active and reactive power is established, the travelling behaviors of EVs are statistically analyzed, and the response model for the participation of EV users is proposed considering the compensation price according to the response capacities of different type of EVs. On this basis, the model of E-EPP considering the participation of EV users is built, and the response capacities of active and reactive power, the energy storage capacity and the cost function for price response of the E-EPP are defined, which provides key parameters for E-EPP to realize power dispatch in the electricity market. The typical case validates the effectiveness of the proposed E-EPP model. The simulative results show that the response capacity and the energy storage capacity of E-EPP have the characteristic of temporal distribution, and the price response of E-EPP is closely related with the compensation price.

Key words: electric vehicles; vehicle-to-grid; efficient power plant; participation factor; price response; response capability; models

(上接第 193 页 continued from page 193)

Position sensorless control of five-phase BLDC motor under single-phase open circuit fault

TIAN Bing, AN Quntao, DUAN Jiandong, SUN Li, ZHAO Ke

(School of Electrical Engineering & Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: To increase the fault tolerant capability and reliability of the driving system for five-phase motor, the position sensorless control of five-phase permanent magnet BLDC(BrushLess DC) motor under single-phase open circuit fault is investigated. A novel decoupled fault tolerant motor model is introduced, and the field oriented control and carrier pulse width modulation under single-phase open circuit fault are realized. A sliding mode observer is used to estimate the fundamental back-EMF(ElectroMotive Force) of the five-phase motor. However, the 3rd harmonic winding and nonlinearity of electric inverter result in chattering harmonic in estimated back-EMF under the open circuit fault mode. To tackle this problem, an improved complex coefficient filter is proposed, which can replace the first-order low-pass filter in smoothing back-EMF without phase and magnitude distortions, and hereby can improve the accuracy of estimated position and enhance motor dynamic characteristics under sensorless control. The position sensorless control method under single-phase open circuit fault is performed on the experimental platform, and the effectiveness of the proposed control method is confirmed by experimental results.

Key words: complex coefficient filter; decoupled fault tolerant motor model; single-phase open circuit fault; position sensorless; DC motors; failure analysis