

考虑大规模电动汽车入网的经济调度问题

李婷婷, 娄柯

(安徽工程大学检测技术与节能装置重点实验室, 安徽 芜湖 241000)

摘要:针对大规模的电动汽车无序入网充电导致电力系统运行不稳定的问题,提出了基于峰谷分时电价进行有序充放电的策略,该策略考虑了电动汽车用户的响应程度对其实际应用的影响。具体阐述了峰谷分时电价划分的方法和用户充放电时刻的选择。根据电动汽车时空分布规律,分别构建了电动汽车无序充电和基于峰谷分时电价的有序充放电模型。从微网系统和用户侧两方面建立了以微网系统运行成本、系统负荷波动、车主充电成本为目标函数的经济调度模型。采用粒子群算法对算例模型进行求解,得到了不同充放电方式下电动汽车和其各分布式微源的出力结果,验证了有序充放电策略的有效性和可行性。研究结果表明峰谷分时电价机制下的有序充电明显优于无序充电,电动汽车车主对有序充电的响应程度越高,越能提高微网系统的经济效益和环境效益。

关键词:微网;电动汽车;峰谷分时电价;有序充放电;经济调度模型;粒子群算法

中图分类号:TM73

文献标志码:A

引言

随着石化资源的日渐枯竭,节能减排技术越来越受到关注,各国政府都在大力发展新型清洁能源的交通工具,电动汽车(Electric Vehicle, EV)成为人们关注的焦点。电动汽车车主充电行为具有随机性,当电动汽车的普及程度较低时,充电行为不会给配电网带来太大的负面影响;但随着电动汽车市场占有率的不断提高,大规模电动汽车的无序充电行为会给配电网带来很多危害,如对系统负荷的影响。因此,如何引导电动汽车有序、有效地参与微网经济调度是一个非常重

要的课题。

目前,已经有学者对此进行了深入研究。文献[1-3]在考虑了经济效益和环境效益的基础上,建立了微电网多目标函数优化模型。文献[4]提出了不同类型的电动汽车充电负荷的计算模型及基于蒙特卡洛模拟的电动汽车充电负荷计算方法。文献[5]研究了微网在孤岛运行模式下利用模糊算法计算服务成本,根据服务成本来决定电动汽车充电状态,但并未对微网并网运行状态进行讨论。文献[6]根据电动汽车时空分布特性建立了无序充电和有序充放电模型,但并没有对分时电价策略进行讨论。文献[7]基于综合博弈模型,提出了电动汽车

收稿日期:2018-06-26

基金项目:安徽省高校自然科学基金项目(KJ2016A058)

作者简介:李婷婷(1993-),女,安徽阜阳人,硕士生,主要从事含电动汽车的微网运行方面的研究,(E-mail) 18315382698@163.com;

娄柯(1979-),男,安徽宿州人,副教授,硕士生导师,主要从事移动传感器网络信息融合和协同控制方面的研究,(E-mail) louke1979@163.com

充电负荷的协调控制方法。文献[8]以实时电价为基础,建立了一种适用于电动汽车充电环境下的收费实时价格机制,通过执行算法使得充电系统效益最大化,但以上研究都未涉及微网的经济调度问题。

本文首先对电动汽车数学模型进行了分析,接着对峰谷分时电价机制进行了研究,形成了有序充放电模型。然后构建了多目标函数的经济调度模型对算例进行仿真,仿真结果表明,有序充放电可以有效平抑负荷峰谷差,使各微源出力更具有经济效益。

1 电动汽车数学模型

1.1 电动汽车用户的行驶行为特性

影响电动汽车充电负荷行为的因素主要有日行驶里程、开始充电时刻和停泊时长等。

电动汽车的日行驶里程近似为对数正态分布,即 $s \sim \log(\mu_s, \sigma_s^2)$, 其概率密度函数为^[9]:

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

返程时刻 t_0 服从正态分布,即 $t_0 \sim N(\mu_t, \sigma_t^2)$, 其概率密度函数为:

$$f_t(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - \mu_t)^2}{2\sigma_t^2}\right), \mu_t - 12 < x < 24 \\ \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{[x - (\mu_t - 24)]^2}{2\sigma_t^2}\right), 0 < x < \mu_t - 12 \end{cases} \quad (2)$$

由式(1)可得电动汽车日行驶里程,由式(2)可得电动汽车最后返程时刻 t_0 。

1.2 电动汽车无序充电模型

电动汽车无序充电是指没有任何制约和经济政策的激励下,车主均按照个人习惯选择充电。

由日行驶里程 S , 每百千米耗电量 E_{p100} , 充电功率 P_{ch} 及充电效率 η 可得电动汽车持续充电时长:

$$\Delta T_{ch} = \frac{SE_{p100}}{100P_{ch}\eta}$$

抽取每辆电动汽车的开始充电时刻、充电功率、日行驶里程等即可得其充电负荷。然后采用蒙特卡洛算法,对每辆电动汽车的充电负荷进行累加,得到总的电

动汽车充电负荷曲线^[10]。

1.3 峰谷分时电价政策下的充放电模型

电能是具有时空差异性的特殊商品,而电动汽车充电负荷又与常规负荷不同,具体表现为时间上和空间上的随机性,所以车主正确的选择充放电时间有助于电动汽车更好的利用电能。峰谷分时电价机制是车主选择充放电时间的重要依据。根据用电负荷曲线高峰低谷的现象,将一天的时间分为峰、平、谷三个时段,并制定相应的电价:

$$Price(t) = \begin{cases} P_v, t_{c1} \leq t \leq t_{c2} \\ P_p, t_{d1} \leq t \leq t_{d2} \\ P_f, \text{other} \end{cases}$$

式中, P_v 、 P_p 、 P_f 分别是谷、峰、平电价, t_{c1} 、 t_{c2} 分别为谷电价的开始时刻和结束时刻, t_{d1} 、 t_{d2} 为峰电价的开始时刻和结束时刻。

用户选择开始充放电时刻由以下公式决定:

$$t_{ch} = \begin{cases} t_{c1} + k_1 \times (\Delta t_1 - t_c), 0 \leq t_c \leq \Delta t_1 \\ t_{c1}, \text{other} \end{cases} \quad (3)$$

式中, t_{ch} 为开始充电时刻; t_c 为充电时长; $\Delta t_1 = t_{c2} - t_{c1}$, 为谷电价时段长度; $k_1 \in [0, 1]$ 。

$$t_{dis} = \begin{cases} t_{d1} + k_2 \times (\Delta t_2 - t_d), 0 \leq t_d \leq \Delta t_2 \\ t_{d2}, \text{other} \end{cases}$$

式中, t_{dis} 为开始放电时刻; t_d 为放电时长; $\Delta t_2 = t_{d2} - t_{d1}$, 为峰电价时段长度。

式(3)表示如果车主充电时长大于谷电价时段长度,车主应选择在谷电价开始时刻进行充电;如果充电时长小于谷电价时段长度时,则车主可以选择在谷电价时段的任意时刻来开始进行充电^[11]。放电过程同理,暂不叙述。故用户可以根据式(3)来选择充放电时刻。

在实际日常充电中,并不是所有的电动汽车用户都会响应峰谷分时电价机制。本文将电动汽车车主对分时电价机制的响应程度 η 定义为在峰、谷电价时段进行有序充放电的电动汽车数量 n_{ev} 占调度中总电动汽车数量 N_{ev} 的比例,则有:

$$n_{ev} = \eta N_{ev}$$

平电价 P_f 、峰电价 P_p 、谷电价 P_v 之间的关系为:

$$\begin{aligned} P_p &= P_f + k_p \cdot p_j \\ P_v &= P_f - k_v \cdot p_j \end{aligned}$$

式中, k_p 、 k_v 分别为峰电价、谷电价系数。

分时电价机制的响应程度 η 与平电价 P_f 、峰电价 P_p 、谷电价 P_v 之间设有如下的关系:

$$\eta = \frac{P_p - P_v}{P_f} = \frac{k_p + k_v}{1 + k_p}$$

2 微网经济调度

2.1 目标函数

从微网系统和用户侧两方面综合考虑,提出了多目标经济调度模型,表示如下^[12]:

$$\begin{cases} \min F = \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)\} \\ \text{s. t.} & g_i \leq 0, i = 1, 2, \dots, q \\ & h_j = 0, j = 1, 2, \dots, p \end{cases}$$

式中, $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, 为 n 维决策项量; $f_k(x)$ 为第 k 个目标函数; $g_i \leq 0$, 为 q 个不等式约束条件; $h_j = 0$, 为 p 个等式约束条件。

选取微网系统运行成本、等效负荷波动和车主充放电成本作为目标函数。

(1) 目标函数 1: 微网运行成本 f_1 最低

$$\begin{aligned} \min f_1 &= f_{\text{Fuel}} + f_{\text{OM}} + f_{\text{GRID}} + f_{\text{DC}} \\ f_{\text{Fuel}} &= K_{\text{Fuel}} \times P_i \\ f_{\text{OM}} &= K_{\text{OM}} \times P_i f_{\text{DC}} = C_{\text{Ins}} \frac{d(1+d)^l}{(1+d)^l - 1} \times \frac{1}{P_{\text{max}} \times 8760 \times f_c} \times P_i \end{aligned} \quad (4)$$

式中, f_{Fuel} 、 f_{OM} 分别为发电单元燃料和运行管理成本, 元; f_{DC} 为微网与电网交互成本, 电价按照实时电价计算, 元; f_{DC} 为各发电单元折旧成本, 元; K_{Fuel} 、 K_{OM} 分别为发电单元燃料消耗系数; P_i 为发电单元 i 发出的电量, kW; P_{max} 为发电单元的最大输出功率, kW; f_c 为容量因素; C_{Ins} 为微源单位容量安装成本, 元; d 为利率, 为 8%; l 为发电单元寿命。

(2) 目标函数 2: 系统等效负荷波动 f_2 最小。

有序充放电可平抑因电动汽车充电而带来的负荷波动, 平抑效果用标准差来表示, 标准差越小表示平抑效果好, 反之则波动大, 平抑效果差。

$$\min f_2 = \sqrt{\frac{\sum_{t \in T} [P_s(t) - P_{av}(t)]^2}{N_k - 1}} \quad (5)$$

$$P_{av} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T P_s(t)$$

$$P_s(t) = P(t) + P_{ev}(t) + P_w(t) + P_{pv}(t) + P_{ba}(t)$$

式中, T 为一天的时长; N_k 为一天采样点总数, 即 24; P_{av} 为平均负荷功率; $P_s(t)$ 为 t 时刻系统的等效负荷功率; $P(t)$ 为 t 时刻负荷功率; $P_{ev}(t)$ 为 t 时刻电动汽车充放电功率; $P_w(t)$ 为风机发电功率; $P_{pv}(t)$ 为光伏发电功率; $P_{ba}(t)$ 为蓄电池充放电功率。

(3) 目标函数 3: 电动汽车车主充电成本 f_3 最小。

为了使充电成本最低或放电收益最大, 车主可以通过峰谷分时电价机制来选择充电起始时刻, 电价低谷时充电, 电价高峰时电动汽车通过 V2G 协议把电能输送给微网, 增加收益。

$$\min f_3 = \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^n \left[r(t) P_{ev}(t) \eta_c + \frac{q(t) P_{ed}(t)}{\eta_d} \right] \Delta t \quad (6)$$

式中, $r(t)$ 为 t 时刻电动汽车充电时的电价; $q(t)$ 为 t 时刻电动汽车放电时的电价; η_c 为电动汽车充电效率; η_d 为电动汽车放电效率; Δt 为充放电持续时间。

2.2 约束条件

(1) 系统功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^N P_{Gi}(t) + P_{grid}(t) = P_{load}(t) + P_{evload}(t)$$

式中, $P_{Gi}(t)$ 为第 i 个发电单元的出力; $P_{grid}(t)$ 为微网与电网之间的传输功率; $P_{load}(t)$ 为常规负荷; $P_{evload}(t)$ 为电动汽车的充放电功率。

(2) 各发电单元有功功率限制

$$P_{Gimin} < P_{Gi} < P_{Gimax}$$

式中: P_{Gimax} 、 P_{Gimin} 分别是发电单元出力的上、下限。

(3) 充放电功率限制

$$P_{evmin} < P_{evi}(t) < P_{evmax}$$

式中: P_{evmax} 、 P_{evmin} 分别为在时刻 t 充放电功率的上、下限。

(4) 电池荷电状态限制

$$SOC_{min} \leq SOC_i \leq SOC_{max}$$

式中, SOC_i 为第 i 台电动汽车荷电状态; SOC_{max} 、 SOC_{min}

为电池核电状态的上、下限。

(5) 柴油机组爬坡率限制

$$|P_c(t) - P_c(t - 1)| \leq r_{\max} \times \Delta t$$

式中, $P_c(t)$ 、 $P_c(t - 1)$ 分别表示柴油机组在时刻 t 和 $t - 1$ 的出力; r_{\max} 是柴油机最大爬坡率, kW/min。

2.3 求解算法

2.3.1 粒子群算法

粒子群优化算法是一种群体智能全局优化算法, 具有计算速度快、收敛速度快、简单易操作的特点^[13-14]。

粒子群算法流程如图1所示。

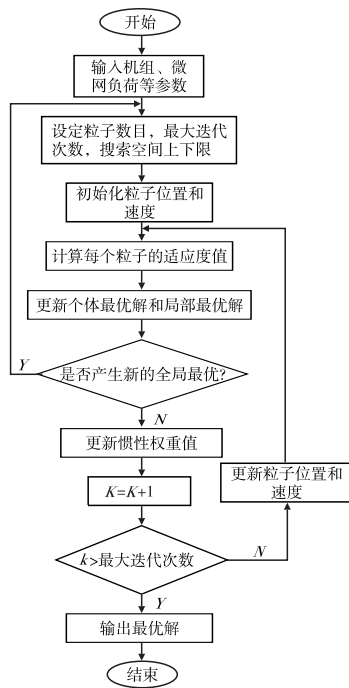


图1 粒子群算法流程图

首先, 随机初始化一群粒子, 粒子的位置为:

$$X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})^T$$

粒子的速度为:

$$V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id})^T$$

粒子通过以下的式(7)来更新位置和速度, 不断地迭代直至寻找到最优解。

$$\begin{cases} x_{i,d}^{k+1} = x_{i,d}^k + v_{i,d}^k \\ v_{i,d}^k = w \cdot v_{i,d}^k + c_1 \cdot r_1 \cdot (pbest_{i,d}^k - x_{i,d}^k) + c_2 \cdot r_2 \cdot (gbest_{i,d}^k - x_{i,d}^k) \end{cases} \quad (7)$$

式中, $i = 1, 2, \dots, m$; r_1, r_2 是 0 到 1 之间的随机数;

$x_{i,d}^k, v_{i,d}^k$ 分别表示粒子 i 第 k 次迭代中第 d 维的位置和速度; w 为惯性因子; c_1, c_2 为学习因子; $pbest_{i,d}^k$ 表示第 k 次迭代中第 d 维第 i 个粒子的个体最优解; $gbest_{i,d}^k$ 表示到第 k 次迭代中第 d 维第 i 个粒子的全局最优解。

为了尽快寻找到全局最优解, 采用惯性权重法。开始迭代时 w 取较大初值, 在迭代过程中不断变小, 这可使粒子群搜索空间更加宽泛, 到后期 w 逐渐收缩变小, 这样可使优化更加精细、收敛速度加快、目标精度提高。具体公式如下:

$$w = w_{\max} - \frac{w_{\max} - w_{\min}}{K} \cdot k$$

式中, w_{\max} 为惯性因子上限, w_{\min} 为惯性因子下限, 一般取 $w_{\max} = 0.9, w_{\min} = 0.4$; k 为当前迭代数; K 为最大迭代数。

2.3.2 粒子群算法在微网经济调度中的应用

粒子群算法中, 每个粒子的个体包括光伏发电、风力发电、燃料电池、柴油机、电动汽车等微源单元, 即每个粒子都代表了电力系统中一种确定的运行方式。

(1) 粒子群算法应用到微网中的步骤

将改进粒子群算法应用到微网调度中的具体步骤为:

(a) 初始化种群: 确定种群大小。每个粒子维度由各微源组成, 粒子位置中每个元素都表示某机组、某时刻的出力, 并根据以下公式确定初始功率:

$$P_i = P_{i\min} + \partial_i \cdot (P_{i\max} - P_{i\min})$$

式中, P_i 表示第 i 个微源初始功率; $P_{i\max}, P_{i\min}$ 分别为功率 P_i 的上、下限; ∂_i 为为 0 至 1 之间的随机数。

(b) 计算适应度函数值: 将目标函数式(4) - 式(6)作为种群的适应度函数值, 计算出种群各个粒子的历史最优值, 并算出群体最优值 $gbest$

(c) 代入优化公式: 算出 $pbest_{id}, gbest_d$ 后, 将粒子代入式(7), 经优化得到新的粒子, 并对每个粒子进行范围约束。

(d) 判断是否满足终止条件: 若满足则结束迭代, 不满足则返回步骤(b)。

(2) 粒子位置调整步骤

实际调度属于动态经济调度问题,在微网实际运行中要考虑到相邻调度时段的配合、柴油机组爬坡率等因素,因此每次粒子在迭代时都需要根据约束条件进行位置调整,具体步骤如下^[15]:

(a) 根据各约束条件的上下限对机组出力进行调整,机组越上限时则将其出力限定在上限;机组越下限时,则将其出力限定在下限。

(b) 根据柴油机约束对机组出力进行调整,机组向上爬坡时,若越限,则出力限定在向上爬坡的上限;向下爬坡时,若越限,则出力限定在向下爬坡的下限。

(c) 根据调整后的机组出力,再次进行潮流计算,确定 PCC 点的出力状态。

3 算例分析

3.1 算例模型概述

微网系统由光伏发电机组(PV)、风力发电机组(WT)、柴油发电机(DE)、燃料电池组(FC)和电动汽车(EV)组成。按照一天为一个调度周期,微网系统中常规负荷数据及风光发电出力预测情况如图2所示。考虑80台可调用电动汽车,并网时大电网与微网功率交换上限为300 kW;电动汽车电价为实时电价,平电价为0.832元/kW·h,峰谷时段分别为1.107元/kW·h、0.349元/kW·h。

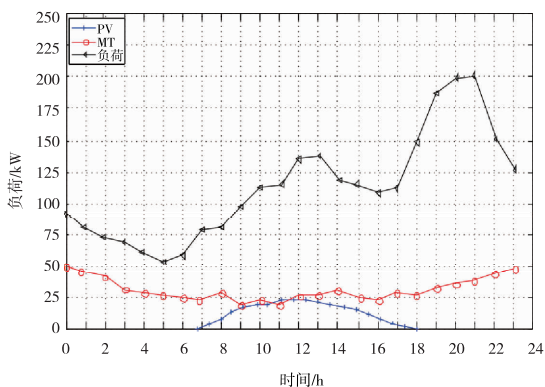


图2 基础负荷功率和风光出力预测情况

在图2所示的基础负荷功率的基础上,对电动汽车无序充电和考虑峰谷分时电价机制下的有序充放电进行仿真,仿真结果如图3所示。

从图3可知,相比没有电动汽车充电情况下的基础

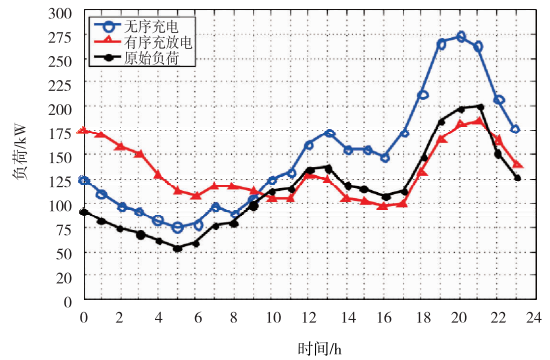


图3 无序充电和有序充放电负荷曲线

负荷曲线和无序充电状态时的微网负荷曲线,基于峰谷分时电价机制的电动汽车有序充放电行为可以有效地改善负荷曲线的峰谷差,平抑了负荷波动,有利于电网系统安全稳定的运行。

3.2 分布式微源出力结果分析

采用改进粒子群优化算法对上述电网调度模型进行求解^[16],在不同的充电方式下得到的各分布式电源出力结果分别如图4(电动汽车无序充电)、图5(电动汽车有序充放电)所示。根据最大化利用可再生能源的原则,在系统负荷曲线中没画出风光出力功率曲线。

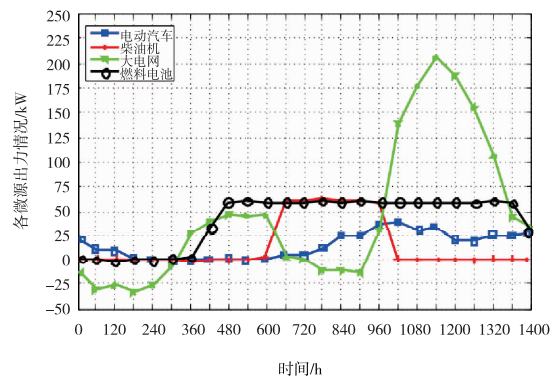


图4 电动汽车无序充电时的调度结果

从图4可知,电动汽车无序充电集中在时刻960~1440时(即16:00~24:00)进行,而此时段刚好是日常负荷的高峰,这不仅增加了负荷高峰期的用电量,还加重了大电网的供电负担,且由于这段时间电价也较高,因此也给车主造成了更大的经济负担。

从图5中可知,按照峰谷分时电价模型来进行有序充电时,电动汽车车主选择在夜间0~420时(即0:00~7:00)充电,这既能保证电动汽车储能,也能合理利用大电网

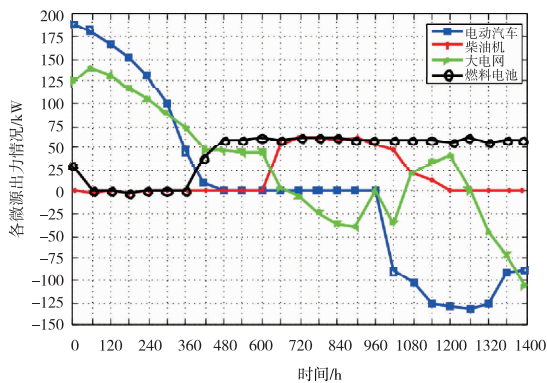


图5 电动汽车有序充放电时的调度结果

电能,使燃料电池、柴油机出力皆最低,达到经济效益最优。电动汽车采用峰谷分时电价模型对微网进行有序放电,不仅减轻了电网供电的负担,还可以给车主带来经济效益。

从以上的分析结果可知,峰谷分时电价机制下的有序充电比无序充电更具有明显的优势,且电动汽车车主对按照峰谷分时电价模型来进行有序充电的响应程度越高,越能提高微网系统的经济效益和环境效益。

3.3 目标函数分析

电动汽车不同充电方式下的目标函数值结果见表1。

表1 两种方式的目标函数对比(单位:元)

	发电成本 f_1	系统等效负荷 波动 f_2	车主充成本 f_3
无序充电	105.40	76.58	57.10
有序充放电	103.08	66.81	-12.28

从表1可知,在发电成本方面,电动汽车有序充放电较无序充电系统成本降低了2%,所以电动汽车可节省微网储能配置费用,提高运行经济效益。在系统等效负荷波动方面,电动汽车有序充放电可在负荷需求较高时段,在满足用户出行的情况下参与V2G调度向微网系统提供电能,平衡负荷需要,使系统负荷波动降低了12.8%,提高了系统的稳定性。对于车主来说响应峰谷分时电价机制进行有序充放电,将从需要支付57.10元(无序充电)变成获得收益12.28元(有序充放电),给车主自身带来利益。由此说明在峰谷分时电价机制下合理的选择充电入网时间的方式能够在发电成本、系统等效负荷波动、车主充电成本三个目标函数下得到更好的

优化结果。

4 结束语

本文研究了基于峰谷分时电价机制下电动汽车有序充电策略,利用电网实时电价信息使车主合理的选择入网充电时间,节约充电成本;对含风光发电及其他微源的微网系统进行经济调度,得到的调度结果与无序充电进行分析比较,发现有序充放电能使电动汽车避免在负荷高峰时段给微网带来“峰上加峰”的危害,更好的发挥电动汽车移动储能的特性。同时有序充放电使微网中各分布式电源出力情况也有显著效果,让系统运行更具有经济性。在未来,随着电动汽车的普及,电动汽车车主对峰谷分时电价机制响应度将更高,微网的经济和环境效益也能进一步提高。

参考文献:

- [1] 刘小平,丁明,张颖媛,等.微网系统的动态经济调度[J].中国电机工程学报,2011,31(31):77-84.
- [2] 陈洁,杨秀,朱兰,等.微网多目标经济调度优化[J].中国电机工程学报,2013,33(19):57-66.
- [3] 吴昊,王艳松.基于智能单粒子算法的微电网经济调度[J].电力系统保护与控制,2016,44(20):43-49.
- [4] 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(14):36-420.
- [5] 刘文霞,张敏,张建华,等.电动汽车负荷对配电网可靠性影响的量化分析[J].电力系统及其电力系统及其自动化学报,2013(4):1-6.
- [6] 庄怀东,吴红斌,刘海涛,等.含电动汽车的微网系统多目标经济调度[J].电工技术学报,2014(S1):365-373.
- [7] LIU Z X, WU Q W, HUANG S J, et al. Optimal day-ahead charging scheduling of electric vehicles through an aggregative game model[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, PP(99):1-12.
- [8] LU Z G, QI J T, ZHANG J F, et al. Modeling dynamic demand response for plug-in hybrid electric vehicles based on real-time charging pricing[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2017, 11(1):228-235.

- [9] VYAS A, SANTINI D. Use of national surveys for estimating 'full' PHEV potential for oil use reduction [EB/OL]. [2008-07-21]. <http://www.transportation.anl.gov/pdfs/HV/5>
- [10] 王博,艾欣.考虑V2G用户响应度的峰谷电价时段优化有序充电[J].现代电力,2016,33(2):39-44.
- [11] 李昊扬.基于需求侧响应的电动汽车有序充电研究[D].天津:天津大学,2012.
- [12] 郭宁,滕欢,李基康.考虑综合评估的孤立微网优化调度[J].电力建设,2016,37(4):63-69.
- [13] 刘逸.粒子群优化算法的改进及应用研究[D].西安:西安电子科技大学,2013.
- [14] 李雨江,潘博.基于自适应变异二进制粒子群算法的WSN区域覆盖问题研究[J].四川理工学院学报:自然科学版,2018,31(1):20-24.
- [15] 宁阳天,李相俊,麻秀范,等.基于改进粒子群算法的微网动态经济调度算法[J].电力建设,2014,35(6):26-30.
- [16] 徐卫星.基于改进粒子群算法的分布式电源优化配置[J].电气技术,2015(12):71-75.

Considering the Economic Dispatch of Large-scale Electric Vehicles to Grid

LI Tingting, LOU Ke

(Anhui key Laboratory of Detection Technology and Energy Saving Devices, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China)

Abstract: Aiming at the problem of the unstable factors in power system operation caused by large-scale electric vehicles entering the network, an orderly charge and discharge strategy based on peak-to-valley time-of-use electricity price is proposed. The strategy considers the influence of the response degree of electric vehicle users on the practical application of the strategy. The method of dividing the peak-to-valley time-of-use electricity price and the choice of the user's network access time are expounded in detail. According to the space-time distribution law of electric vehicles, the disordered charging of electric vehicles and the orderly charge and discharge load model based on peak-to-valley time-of-use electricity prices are constructed, respectively. An economic scheduling model based on the operating cost, load fluctuation and charging cost of the micro grid system is established from the two aspects of the micro grid system and the user. The particle swarm optimization algorithm is used to solve the model, and the output results of the electric vehicle and its distributed microsources under different charging and discharging modes are obtained, and the validity and feasibility of the orderly charging and discharging strategy are verified. The results show that the ordered charging is obviously better than the disordered charging under the peak-valley time-sharing pricing mechanism. The higher the response of electric vehicle owners to the orderly charging is, the higher the economic and environmental benefits of the micro-grid system can be improved.

Key words: microgrid; electric vehicle; peak-to-valley time-sharing electricity price; ordered charge and discharge; economic dispatch model; particle swarm optimization