

高速公路充电站电动汽车有序充电策略

陈立兴¹, 黄学良²

(1. 江苏理工学院 电气信息工程学院, 江苏 常州 213001;

2. 东南大学 电气工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要:为了解决高速公路充电站电动汽车的无序充电问题,考虑充电站的运行状态和电动汽车用户的充电习惯,提出了一种基于新电价机制激励用户调整充电时间的有序充电策略。为了验证有序充电的有效性,建立了充电站排队模型,并根据相关数据通过蒙特卡罗方法和排队算法分别对746、480以及240辆纯电动汽车00:00—24:00在充电站中的充电情况进行了仿真。仿真结果表明:与无序充电相比,有序充电不仅可以减少用户的充电成本和等待时间,还可以提高充电站的充电设施利用率,减小对高速公路交通的影响。

关键词:高速公路充电站;电动汽车;充电电价;有序充电;排队算法;蒙特卡罗方法;模型

中图分类号:U 469.72

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.01.017

0 引言

随着电动汽车的规模化普及,在高速公路沿线建设快速充电站将为电动汽车长距离行驶提供条件,同时也将带来高速公路上电动汽车的有效充电问题,如充电站因快速充电桩的充电效率低,还不能很好地满足电动汽车用户的多样性充电需求。

据统计,65%的汽车用户选择“整钱加”的方式进行加油,35%的用户选择加满^[1]的加油方式,故用户的加油需求具有多样性。因用户长期使用燃油汽车养成的加油习惯,在为电动汽车充电时,同样也存在多样性的充电需求。通常加油站中加油枪的效率很高,3~5 min就可完成加油服务,因此可以很好地满足用户的多样性加油需求^[2]。但与加油站相比,充电站中快速充电桩的充电效率很低。即使是目前处于世界领先地位的特斯拉快速充电技术,其超级充电桩的输出功率高达120 kW,若为起始电量为10%的Model S85电动汽车电池充电,30 min可充电至80%,65 min可充满电^[3],因此其充电效率(若充电时间为30 min)仅为加油枪效率(若加油时间为5 min)的1/6,如此低的充电效率难以满足用户的多样性充电需求。由于快速充电技术在短时间内难以突破,故不能以此来提高快速充电桩的充电效率。

在充电功率一定的前提下,不同用户的充电时间与其充电需求成正比,即大充电需求用户的充电时间长,小充电需求用户的充电时间短。用户充电需求的多样性使得不同用户的充电时间存在很大的差异性。这种差异性将会给用户、充电站和高速公

路造成不良的影响:当充电站忙时,大充电需求用户长时间地占用充电资源,会造成排在其后的用户因长时间等待而产生抱怨,同时后续车辆陆续到达,使得充电站的排队长度较长,从而影响附近道路交通和其他用户出行;当充电站闲时,若站内用户充电需求均较小,则会降低充电设施的利用率,从而造成充电资源的浪费。由此可见,高速公路电动汽车充电需求的多样性问题实际上已经演变为一种电动汽车无序充电问题。虽然该问题会随着未来电池技术和快速充电技术的突破而得到解决,但在各项技术尚未突破的时期,仍需通过一种有序引导策略来缩小用户充电需求的差异性,以解决高速公路电动汽车的无序充电问题。

为了解决电动汽车无序充电的问题,目前研究大多为基于分时电价的电动汽车有序充电策略。文献[4]综合考虑公交车的运行规律、峰谷电价和充电机的数量,提出了充电站经济运行有序充电策略,将车辆2次进站时间间隔作为优化时间范围,通过优化换电池的起始充电时间,达到降低充电站运行成本的目的。文献[5]根据电动公交车的运行特性,在分时电价下提出了公交充电站的有序充电策略,通过控制各台充电机的充电时段,实现对电动公交车快速充电的协调控制。文献[6]综合考虑光伏出力、峰谷电价和单位停车场电动汽车停运的特点,提出了光伏充电站电动汽车的有序充电策略,将停车时段作为充电时间并且每辆车均配有一台充电机,通过分段优化电池的充电功率,达到平滑光伏出力波动和降低用户充电成本的目的。文献[7]综合考虑光伏出力、电动汽车停运特点和储能系统寿命,提出基于峰谷电价的电动汽车有序充电策略,通过电动汽车充电、光伏出力和蓄电池循环电量的协同运行,从而发挥其协同增效的优势。文献[8]综合考虑用户的充电需求和电网负荷水平,提出了基于

收稿日期:2018-05-18; **修回日期:**2018-11-11

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFB0101800);江苏理工学院人才引进项目(KYY17018)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2016YFB0101800) and the Talent Introduction Project of Jiangsu University of Technology(KYY17018)

动态分时电价的小区充电站电动汽车有序充电策略,以削峰填谷为目标,通过优化接入充电站电动汽车的分时电价时段,引导用户自主响应,从而降低小区充电站的运营成本和用户的充电成本,并有效地实现充电负荷削峰填谷的目的。文献[9]考虑用户的充电需求及配电变压器的容量,提出两阶段优化模型的充电站电动汽车有序充电策略,通过优化起始充电时间最大化地将用户安排在谷电价时段充电,从而提高充电站的经济效益,减少电网峰谷差。此外,还有少数关于在电动汽车有序充电策略中引入时变电价的研究。文献[10]将表征配电网电压水平的时变电价引入充电策略中,可有效地降低用户的充电成本、改善配电网的电压水平。文献[11]从兼顾电动汽车充电平衡度和用户满意度2个方面深入研究了时变电价,可有效地引导用户进行有序充电。

以上研究均基于城市内部电动汽车特定场合(如公交充电站^[4-5]、单位^[6]、小区^[7-9]等)的停车特点(即车辆存在集中停留时段,且持续时间长,一般为6~10 h)和充电设施资源充足的条件,开展了充电站电动汽车有序充电问题的研究。但高速公路充电站内电动汽车进站的随机性大,单辆车停留的时间短(一般为0.5~1 h),且站内充电设施的数量有限,并不是每一个充电站均配置相应的储能系统和新能源发电设施。因此,单纯地优化起始充电时间^[4,9]、分段充电功率^[6-7]、分时电价时段^[8]及时变电价^[10-11]的可行性较低。此外,高速公路上电动汽车的大部分行驶时间集中于白天,故基于峰谷电价的有序充电策略难以解决高速公路充电站电动汽车的无序充电问题。实际上,用户充电需求具有可调空间。因此,本文考虑充电站的运行状态提出了一种基于新电价机制调整用户充电时间的电动汽车有序充电策略,即用户在充电站忙(电价高)时少充电,在充电站闲(电价低)时多充电,通过忙闲电价调节并缩小用户充电需求的差异性。

1 基于新电价机制的有序充电策略

对于高速公路充电站而言,其不可避免地会出现某时段车辆太多(称为忙时段)、某时段车辆太少(称为闲时段)。在忙时段,充电站内有大量的电动汽车排队等待,若要减少这些车辆的等待时间,则需要缩短在充电车辆的充电时间。通常减小车辆充电时间的方法有2种:一种是提高其充电功率,另一种是减小其充电需求。然而,在目前的快速充电技术和电池技术下,继续提高电动汽车的充电功率比较困难,因此,在充电功率一定的前提下,忙时段的充电站内等待的车辆多,为了减小其等待时间,可以采取统一减少用户充电时间的方法,以缩小用户充电

需求的差异性;闲时段的充电站内在充的车辆少,为了提高充电设施利用率,充电站可以鼓励用户多充电。即本文所提电动汽车有序充电策略为:用户在充电站忙时少充电,在充电站闲时多充电。值得一提的是,与传统的有序充电^[4-11]不同,本文所提的有序充电不涉及传统的优化建模问题,仅仅是一种运行机制,但其发挥的作用非常显著,具体见后续分析。为了确保这一策略的实施,必须运用实际有效的经济或技术手段对电动汽车的充电进行有序引导。

目前,高速公路充电站只采用1个充电电价,如江苏高速公路充电站的充电电价为1.6元/(kW·h),该电价机制不能起到引导电动汽车有序充电的作用,即该电价为无序充电情形下电动汽车的充电电价。因此,结合文献[12]中电动汽车的充电电价范围和充电站的运行状态,本文引入适用于高速公路电动汽车的新充电电价,并与当前的充电电价进行比较,如表1所示。通过新电价机制激励用户调整其充电时间以实现有序充电^[13]。

表1 高速公路电动汽车新充电电价与当前充电电价的比较

Table 1 Comparison between new charging price and current charging price for electric vehicle on highway

充电站状态	新充电电价/ [元·(kW·h) ⁻¹]	当前充电电价/ [元·(kW·h) ⁻¹]
忙	1.8	1.6
闲	1.4	1.6

根据用户对电价激励自动响应的特点^[14],用户将根据电价的高低调整其充电时间的长短。新充电电价在一定程度上激励了用户到闲置的充电站充电,也保证了用户在充电时段内享受服务前约定的不变电价,这对于所有用户而言都是公平的。

2 充电站排队模型

电动汽车用户在充电站接受充电服务时,不可避免地要花费时间排队等待,从而出现了排队问题。其中充电站和到站的电动汽车共同组成一个排队系统。因此,本文基于充电站的服务特点^[15-16]和经典排队模型^[17],建立了充电站排队模型,包括电动汽车到达时刻模型、等待时间模型和充电时间模型以及充电站的队长模型和充电设施利用率模型。

2.1 电动汽车到达时刻模型

对于位于高速公路路口的充电站而言,由于每个时段到达的电动汽车数量服从泊松分布^[18],因此,电动汽车相继到达的间隔时间服从负指数分布,即电动汽车相继到达的间隔时间的概率密度函数为:

$$f_T(\Delta t) = \lambda e^{-\lambda \Delta t} \quad \Delta t > 0 \quad (1)$$

其中, Δt 为间隔时间; λ 为每个时段到达充电站的电

电动汽车数量,因不同时段到达充电站的电动汽车数量不同,故不同时段车辆相继到达的间隔时间也不同。

根据电动汽车相继到达的间隔时间,可以得到电动汽车 k 的到达时刻为:

$$T_a^k = T_a^1 + \sum_{i=1}^{k-1} \Delta t_i \quad (2)$$

其中, T_a^1 为第 1 辆电动汽车的到达时刻; Δt_i 为第 i 个间隔时间。

2.2 电动汽车等待时间模型

电动汽车的等待时间为充电起始时刻与到达时刻的差值,其计算公式为:

$$T_w = T_s - T_a \quad (3)$$

其中, T_a 为电动汽车的到达时刻; T_s 为电动汽车的起始充电时刻。由于等待时间是影响用户满意度的关键因素之一,因此,本文根据排队等待时间对用户情绪的影响程度^[19],将用户满意度划分为 5 个等级,如表 2 所示。

表 2 用户满意度等级划分

Table 2 Classification of users' satisfaction

等待时间/min	用户情绪	用户满意度
[0,5]	没有变化	非常满意
(5,10]	稍微变化	比较满意
(10,20]	开始急躁	一般满意
(20,40]	表现厌烦	不满意
(40, +∞)	愤怒离去	比较不满意

2.3 电动汽车充电时间模型

目前电动汽车充电采用二阶段法,为了提高充电效率,在第一阶段进行恒功率充电,忽略第二阶段^[6]。因此,电动汽车充电时间的计算公式为:

$$T_c = \frac{(\text{SOC}_e - \text{SOC}_0) Q_{\max}}{P_c} \quad (4)$$

其中, SOC_e 为电动汽车的期望充电电量; SOC_0 为电动汽车的起始电量; $Q_{\max}$ 为电池的额定容量; P_c 为恒功率阶段电动汽车的充电功率。

2.4 充电费用模型

充电费用的计算公式为:

$$C = \eta (\text{SOC}_e - \text{SOC}_0) Q_{\max} \quad (5)$$

其中, η 为电动汽车服务前约定的电价,见表 1。

2.5 充电站队长模型

充电站的队长是指当前时刻 t 充电站内的电动汽车数量,可以反映充电站的忙闲状态。因此根据充电站的队长可以衡量其运行状态,其计算公式为:

$$d(t) = \begin{cases} 0 & 0 < L(t) \leq N_c \\ 1 & L(t) > N_c \end{cases} \quad (6)$$

其中, N_c 为充电站内充电桩的数量; $L(t)$ 为时刻 t 充电站的队长; $d(t) = 0$ 表示充电站闲, $d(t) = 1$ 表示

充电站忙。因此,在有序充电情形下,根据充电站的运行状态,可以制定忙闲电价,如表 1 所示。

2.6 充电设施利用率模型

充电站充电设施利用率的计算公式为:

$$\theta = \frac{1}{N_t N_c} \sum_{t=1}^{N_t} D_t \quad (7)$$

其中, N_t 为时段数; D_t 为时刻 t 充电站内正在运行的充电桩数量。

3 先来先服务排队算法

3.1 先来先服务排队系统

顾客在接受服务时常会碰到排队现象。顾客因服务需求而进入排队系统,排队系统按照顾客到达的先后顺序和服务需求安排服务,一个典型的先来先服务 (FCFS) 排队系统^[17]如图 1 所示。假定该排队系统中有多个服务台,新顾客到达排队系统的时间是相互独立的,与系统的当前状态以及当前的顾客到达时间都无关。同时假设排队系统根据服务台的运行状态和顾客的需求为顾客提供服务。若当前排队系统有空闲的服务台,则根据顾客的进站先后顺序,为顾客提供服务;否则,顾客需要排队等待;服务完毕后顾客离开排队系统。

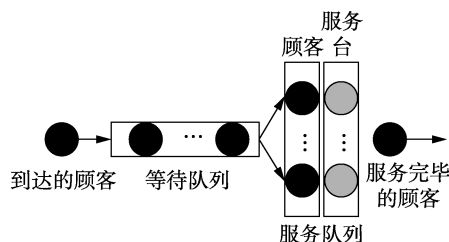


图 1 排队系统

Fig.1 Queuing system

3.2 排队算法流程

FCFS 排队算法优先考虑在等待队列中先到达的顾客,而不考虑服务时间的长短,顾客一旦开始接受服务,就直至服务结束,这样的方法简单、可行。

为了便于算法流程的描述,现定义顾客和服务台的状态如下。

a. 顾客的状态分为到达状态、等待状态、服务状态和离开状态。处于到达状态和等待状态的顾客均进入等待队列,准备接受服务;处于服务状态的顾客正在接受服务;处于离开状态的顾客已经结束服务并离开排队系统。

b. 服务台的状态分为忙碌状态和空闲状态。处于忙碌状态的服务台正在为顾客提供服务;处于空闲状态的服务台暂时停机,但可以随时为顾客提供服务。

本文考虑不同充电策略的特点,将排队算法的执行步骤设计如下。

a. 初始化参数,包括目标快速充电站内充电桩的最大数量和功率限值、电动汽车数量、快速充电站运行时段(最小运行时刻和最大运行时刻)、时间步长;建立信息列表集合,包括目标充电站进站流量列表、目标充电站列表和充电桩列表集;设置所有变量的值为0。

b. 对高速公路入口的车流量历史数据进行统计和拟合得到典型日高速公路电动汽车入口时刻记录;入口车辆的SOC₀和行驶速度均采用正态分布概率密度函数描述;结合高速公路上相邻充电站的站间距离、车主的充电意愿和车辆的剩余电量,得到车主的充电阈值;模拟生成电动汽车车辆在目标充电站的进站流量曲线,并将车辆进站流量信息和车辆基本信息依次存入充电站进站流量列表中。

c. 从充电桩列表集合中读取当前每个充电桩将要服务的最后一辆电动汽车的等待时间,对每个充电桩的编号按照其对应最后一辆电动汽车的等待时间进行升序排序。

d. 从充电站进站列表中,将当前进站电动汽车按照进站次序依次分配给步骤c中排好序的充电桩,根据式(3)依次计算进站车辆的排队等待时间,根据表2计算用户的满意度,依次设置车辆状态为等待状态,并将车辆信息依次存入每个对应的充电桩列表中。

e. 从充电桩列表集合中读取当前每个充电桩的服务进度,并设置其值加1;判断当前每个充电桩的充电进度是否达到车辆的充电时间,若未达到,则执行步骤f,否则执行步骤g。

f. 设置处于服务中的车辆状态为正处于充电服务状态,计算当前充电站的技术参数,包括当前充电站的队长(正在接受充电服务的电动汽车+正在排队等待的电动汽车)、当前充电站的排队长度和当前充电站的电动汽车充电负荷。若采用有序充电策略,则根据当前充电站的队长、式(6)及表1中的新充电电价,设置当前新进站车辆的充电电价,并根据式(5)及有序充电用户的充电需求计算充电费用,根据式(4)计算充电时间;否则,在无序充电策略下,根据表1中的当前充电电价设置当前新进站车辆的充电电价,根据式(5)及无序充电用户的充电需求计算充电费用,根据式(4)计算充电时间。将这些信息存入目标充电站列表中,然后执行步骤h。

g. 在每个充电桩列表中删除离开充电站的电动汽车信息(充电服务过程结束),并设置其状态为离站状态,然后执行步骤h。

h. 设置当前充电站的运行进度值加1,并判断当前充电站的进度是否达到充电站的最大运行进度,若达到,则根据式(7)计算充电设施利用率,退出主程序,输出计算结果;否则执行步骤c。

4 算例分析

本文以某高速公路路口加油站车辆日进站流量数据为基础,建立了充电站排队系统,并对充电站内电动汽车的2种充电情况进行了仿真。其中,仿真时段为00:00—24:00,时间步长为1 min。

4.1 基础参数设置

4.1.1 充电站配置

本文假设充电站配置10个相同类型的快速充电桩,每个充电桩的最大输出充电功率为120 kW。

4.1.2 电动汽车日进站流量

根据高速公路某加油站的日进站流量统计数据,假设3种情形下高速公路充电站的电动汽车日进站流量,见附录中图A1。其中,情形1表示节假日充电站日进站车流量较大,共746辆车;情形2表示普通日充电站日进站车流量正常,共480辆车;情形3表示普通日充电站日进站车流量较少,共240辆车。将3种情形下到达充电站的电动汽车日进站流量分别代入式(1)、(2)可以得到对应情形下车辆的到达时刻。

4.1.3 电动汽车参数

为了便于计算,本文假设所有到达充电站的电动汽车均为Model S85,其电池规格为同一型号,充电特性一致,每辆车的电池容量为85 kW·h,到达充电站时电池的起始电量为10%,并设定有序充电策略下电动汽车用户的期望充电电量,见附录中表A1。其中从10%的电量充电到80%的电量过程会很快,为恒功率充电阶段,同时设定无序充电策略下电动汽车用户的期望充电电量服从均匀分布 $I_{[0.5,0.8]}$,以表示电动汽车充电需求的多样性。设置新充电电价下用户的响应度为100%。

4.2 仿真结果分析

根据电动汽车的到达时刻、充电站配置数据和电动汽车参数,在仿真时段通过排队算法分别对746、480和240辆电动汽车的2种充电策略进行了仿真。其中,不同充电策略下电动汽车的充电时间和充电费用的计算是不同的:有序充电策略下,电动汽车的充电时间和充电费用根据式(4)—(6)、表1、附录中表A1计算得到;无序充电策略下,根据用户的期望充电电量服从均匀分布 $I_{[0.5,0.8]}$ 、表1以及式(4)、(5),通过蒙特卡罗方法^[20]生成电动汽车的充电时间和充电费用。因此,3种情形下采用不同充电策略时电动汽车充电对用户、充电站和高速公路交通的影响仿真分析如下。

4.2.1 对电动汽车用户的影响

由于2种充电策略下用户的总充电电能不同,故通过平均充电电价反映用户节约成本的程度。3种情形下采用不同充电策略时电动汽车的平均充

电电价如表 3 所示。与无序充电相比,电动汽车进行有序充电时,3 种情形下电动汽车平均充电电价分别减少了-6.2%、5.0%和 11.8%。因此,非节假日电动汽车用户采用有序充电可以减少其充电成本。

表 3 3 种情形下采用不同充电策略时
电动汽车的平均充电电价

Table 3 Average charging price of electric vehicle
for three cases under different charging strategies

情形	平均充电电价/ [元·(kW·h) ⁻¹]		有序充电相比无 序充电平均充电 电价降低百分比/%
	有序充电	无序充电	
1	1.70	1.60	-6.2
2	1.52	1.60	5.0
3	1.41	1.60	11.8

3 种情形下采用不同充电策略时用户的满意度如图 2 所示。与无序充电策略相比,当用户进行有序充电时,情形 1、2 下满意的电动汽车用户占电动汽车用户总数的比例分别提高了 17.2%、2.0%,尤其是当节假日车辆进站流量较大时,用户满意度提高的效果最显著。故采用有序充电可减少用户的等待时间,从而提高其满意度。

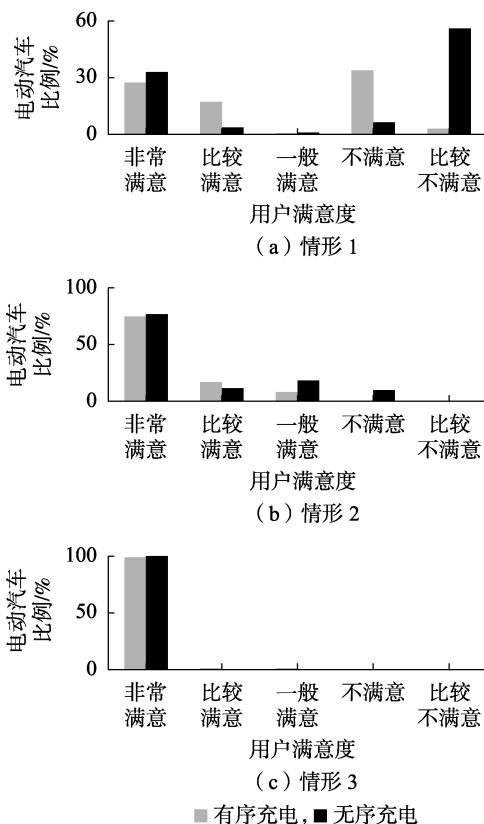


图 2 3 种情形下采用不同充电策略时用户的满意度

Fig.2 Satisfaction of electric vehicle user for three cases
under different charging strategies

4.2.2 对充电站的影响

3 种情形下采用不同充电策略时充电站的充电

设施利用率如表 4 所示。与无序充电策略相比,当用户进行有序充电时,3 种情形下的充电设施利用率分别提高了 1.4%、7.9%和 30.2%,尤其是在普通日车辆进站流量较少时,充电设施利用率提高的效果最显著。故采用新电价引导用户进行有序充电可提高充电设施利用率。

表 4 3 种情形下采用不同充电策略时的
充电站充电设施利用率

Table 4 Charging facility utilization rate of charging station
for three cases under different charging strategies

情形	充电设施利用率		有序充电相比无序 充电充电设施利用 率提高百分比/%
	有序充电	无序充电	
1	0.954 1	0.952 7	1.4
2	0.815 2	0.754 9	7.9
3	0.493 6	0.379 0	30.2

4.2.3 对高速公路交通的影响

3 种情形下采用不同充电策略时充电站的队长仿真结果如图 3 所示。2 种充电策略下,情形 2 和情形 3 下充电站的队长均正常,故对高速公路交通无影响。而当电动汽车进行无序充电时,情形 1 下充电站的最长队长达到 145 辆,持续时间长,即出现了严重的排队现象,故会影响附近高速公路其他车辆的正常行驶,造成交通拥堵。相比之下,情形 1 下采用有序充电策略时的充电站队长为 40 辆,即出现了轻微排队现象,故对高速公路交通影响较小。因此,当节假日车辆进站流量较大时,采用有序充电可以降低对高速公路交通的影响。

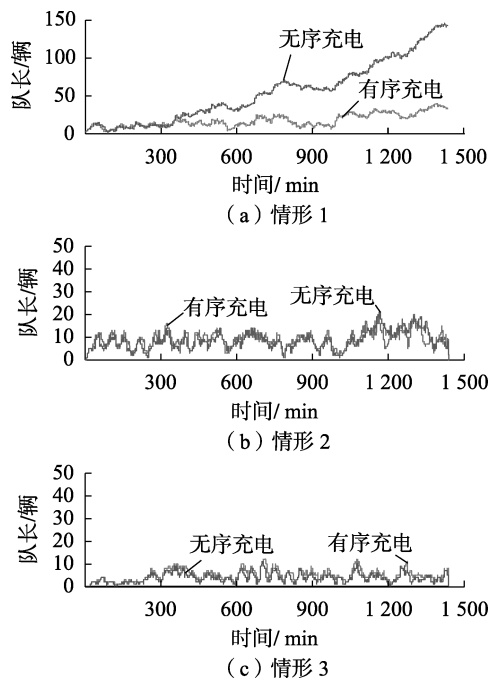


图 3 3 种情形下采用不同充电策略时的充电站队长

Fig.3 Queue lengths of charging station for three cases
under different charging strategies

5 结论

电动汽车进行有序充电可以有效地解决无序充电所带来的问题。对于电动汽车用户而言,通过响应新电价机制调整自身的充电时间,可以减小其充电成本和等待时间,提升了用户满意度;对于充电站而言,通过新电价机制激励用户调整其充电时间,可提高其充电设施利用率;对于高速公路而言,通过新电价机制激励用户调整其充电时间,可以减小充电站的队长,从而减小对附近道路交通的影响。此外,本文所提排队算法可以很好地求解充电站队长和车辆的等待时间,能够为电动汽车进行有序充电提供重要的决策依据。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 腾讯汽车. 汽车加油习惯调查报告[EB/OL]. (2009-06-23) [2018-01-02]. <http://auto.qq.com/zl/2009/jiayou>.
- [2] 刘宏斌. 加油站建设标准[S]. 北京:中国石油天然气股份有限公司,2010.
- [3] 特斯拉. 超级充电站[EB/OL]. (2016-11-23) [2018-01-02]. <http://www.teslamotors.com/cn>.
- [4] 张帝,姜久春,张维戈,等. 基于遗传算法的电动汽车换电站经济运行[J]. 电网技术,2013,37(8):2101-2107.
ZHANG Di,JIANG Jiuchun,ZHANG Weige,et al. Economic operation of electric vehicle battery swapping station based on genetic algorithms[J]. Power System Technology,2013,37(8):2101-2107.
- [5] 李斌,刘畅,陈慧妙,等. 基于混合整数规划的电动公交车快速充电站有序充电策略[J]. 电网技术,2016,40(9):2623-2629.
LI Bin,LIU Chang,CHEN Huimiao,et al. Coordinated charging of plug-in electric buses in fast charging stations based on mixed-integer programming[J]. Power System Technology,2016,40(9):2623-2629.
- [6] ZHAO G,HUANG X,QIANG H. Coordinated control of PV generation and EVs charging based on improved DECell algorithm[J]. International Journal of Photoenergy,2015(4):1-13.
- [7] 路欣怡,刘念,陈征,等. 电动汽车光伏充电站的多目标优化调度方法[J]. 电工技术学报,2014,29(8):46-56.
LU Xinyi,LIU Nian,CHEN Zheng,et al. Multi-objective optimal scheduling for PV-assisted charging station of electric vehicles[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2014,29(8):46-56.
- [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):3639-3646.
- [9] 张良,严正,冯冬涵,等. 采用两阶段优化模型的电动汽车充电站内有序充电策略[J]. 电网技术,2014,38(4):967-973.
ZHANG Liang,YAN Zheng,FENG Donghan,et al. Two-stage optimization model based coordinated charging for EV charging station[J]. Power System Technology,2014,38(4):967-973.
- [10] 苏舒,孙近文,林湘宁,等. 电动汽车智能充电导航[J]. 中国电机工程学报,2013,33(增刊1):59-67.
SU Shu,SUN Jinwen,LIN Xiangning,et al. Electric vehicle smart charging navigation[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(Supplement 1):59-67.
- [11] SU S,ZHAO H,ZHANG H,et al. An elastic charging service fee-based load guiding strategy for fast charging stations[J]. Energies,2017,10(5):672-691.
- [12] LI Z,OUYANG M G. The pricing of charging for electric vehicles in China:dilemma and solution[J]. Energy,2011,36(9):5765-5778.
- [13] 李瑞生,王晓雷,周逢权,等. 灵巧潮流控制的电动汽车智能化充电站[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(21):87-90.
LI Ruisheng,WANG Xiaolei,ZHOU Fengquan,et al. The system of electric vehicle intelligence charge station with smart power flow control[J]. Power System Protection and Control,2010,38(21):87-90.
- [14] GALUS M D,ANDERSSON G. Demand management of grid connected Plug-in Hybrid Electric Vehicles(PHEV)[C]//2008 IEEE Energy 2030 Conference. Atlanta,GA,USA:IEEE,2008:1-8.
- [15] 葛少云,冯亮,刘洪,等. 考虑电量分布及行驶里程的高速公路充电站规划[J]. 电力自动化设备,2013,33(7):111-116.
GE Shaoyun,FENG Liang,LIU Hong,et al. Planning of charging stations on highway considering power distribution and driving mileage[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(7):111-116.
- [16] 董晓红,穆云飞,于力,等. 考虑配网潮流约束的高速公路快速充电站校正规划方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):124-131.
DONG Xiaohong,MU Yunfei,YU Li,et al. Freeway FCS planning and correction considering power-flow constraints of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(6):124-131.
- [17] VANBERKEL P T,LITVAK N,PUTERMAN M L,et al. Queuing network models for panel sizing in oncology[J]. Queueing Systems,2018,90(3):291-306.
- [18] ZHANG H C,MOURA S J,HU Z C,et al. PEV fast-charging station siting and sizing on coupled transportation and power networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2018,9(4):2595-2605.
- [19] TOM G,LUCEY S. A field study investigating the effect of waiting time on customer satisfaction[J]. The Journal of Psychology,1997,131(6):655-660.
- [20] 张新松,袁越,茅靖峰,等. 基于蒙特卡洛模拟的电池储能系统容量优化配置[J]. 电力自动化设备,2017,37(4):82-88.
ZHANG Xinsong,YUAN Yue,MAO Jingfeng,et al. BESS capacity optimization based on Monte Carlo simulation[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(4):82-88.

作者简介:



陈立兴

陈立兴(1984—),男,河北阳原人,讲师,博士,通信作者,研究方向为电动汽车有序充电(E-mail:Lixingchen19851210@163.com);

黄学良(1969—),男,浙江舟山人,教授,博士研究生导师,从事电动汽车与电网互动、无线电能传输技术和电力电子技术

在电力系统中的应用等方面的研究(E-mail:xlhuang@seu.edu.cn)。

(下转第126页 continued on page 126)

方案设计[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 26-33.

HUANG Renle, PU Tianjiao, LIU Kewen, et al. Design of hierarchy and functions of regional energy internet and its demonstration applications[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 26-33.

[26] 邱海伟. 基于多目标的微电网优化调度研究[D]. 上海: 上海电力学院, 2013.

QIU Haiwei. Research of microgrid optimal operation based on multi-objective[D]. Shanghai: Shanghai University of Electric Power, 2013.

作者简介:



熊 文

熊 文(1973—), 男, 湖南常德人, 高级工程师, 硕士, 主要从事电力系统分析与调度控制以及智能电网技术等方面的工作 (E-mail: haoranxjtu@126.com);

刘育权(1971—), 男, 湖南株洲人, 教授级高级工程师, 硕士, 主要从事电力系统运行优化与控制、智能电网技术等方面的工作 (E-mail: 927962335@qq.com)。

Optimal configuration of multi-energy storage in regional integrated energy system considering multi-energy complementation

XIONG Wen¹, LIU Yuquan¹, SU Wanhua¹, HAO Ran², WANG Yue², AI Qian²

(1. Guangzhou Power Supply Company of China Southern Grid, Guangzhou 510000, China;

2. School of Electrical and Information Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The configuration of multi-energy storage devices in the RIES (Regional Integrated Energy System) can greatly improve the economic benefits of the system and it is an important research direction of RIES planning. Based on the infrastructure and model of RIES, the profit strategies of cooling storage, heating storage, power energy storage and hybrid energy storage in the multi-energy complementation synergistic operation of CCHP (Combined Cooling, Heating and Power) units and electric refrigeration equipment are studied, the economy and feasibility of different energy storage configurations are discussed. A bi-level optimization model for life-cycle dispatching planning of cooling-heating-power energy storage is established, which is solved by the deterministic iterative algorithm. Based on the different daily load curves in multiple power-supply seasons of an actual RIES, the proposed bi-level optimization model is used to solve the operation scheduling scheme and the capacity configuration of energy storages. Simulative results show that the configuration of cooling storage and heating storage in the RIES has a greater profit margin, while the configuration of power energy storage has a smaller profit margin and the configuration of hybrid energy storage can further excavate the profitability of the system.

Key words: cooling-heating-power energy storage; hybrid energy storage; bi-level optimization; regional integrated energy system; multi-energy complementation; optimal configuration

(上接第 117 页 continued from page 117)

Ordered charging strategy of electric vehicles at charging station on highway

CHEN Lixing¹, HUANG Xueliang²

(1. School of Electrical & Information Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China;

2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In order to solve the disordered charging problem of EVs (Electric Vehicles) at charging station on highway, an ordered charging strategy based on the new electricity pricing mechanism, which can motivate the users to adjust their charging time, is proposed considering the operation state of charging station and the charging behavior of EV users. The queuing model of charging station is established to verify the effectiveness of the ordered charging strategy, and the charging behaviors of 746, 480 and 240 battery EVs in the charging station from 00:00 to 24:00 are simulated respectively by Monte Carlo method and queuing algorithm according to related data. Simulative results show that compared with the disordered charging strategy, the ordered charging strategy can not only reduce the charging costs and waiting times of EV users, but also increase the utilization ratio of charging facilities in the charging station and reduce the influence on the highway traffic.

Key words: charging station on highway; electric vehicles; charging price; ordered charging; queuing algorithm; Monte Carlo method; models

附 录

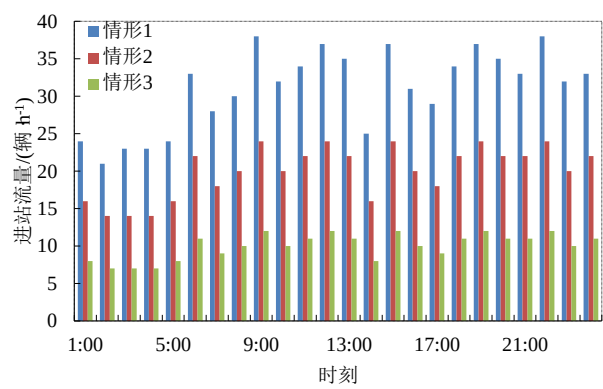


图 A1 3 种情形下电动汽车日进站流量

Fig.A1 Traffic flows of EVs in three cases

表 A1 有序充电策略下用户期望充电电量

Table A1 Expected charging capacity of users under coordinated charging strategy

充电电价/[元 (kW h) ⁻¹]	期望充电电量/%	充电时间/min
1.8	50	17
1.4	80	30