

# 基于模块分割式电池的换电站充电策略优化

毛海鹏<sup>1</sup>,张勇军<sup>1</sup>,王浩林<sup>1</sup>,羿应棋<sup>2</sup>

(1. 华南理工大学 电力学院 智慧能源工程技术研究中心,广东 广州 510640;

2. 广州市奔流电力科技有限公司,广东 广州 511475)

**摘要:**换电模式因具有方便统一管理和利于快捷出行的特点,成为电动汽车不可或缺的一种能源供给模式,充分发挥换电模式的优势进行有序充电对换电站的发展具有重要的意义。在采用K最邻近算法对考虑变量间存在耦合关系的出行数据进行拟合的基础上,建立以电池间的状态转移关系为主要约束条件,以换电站的运营净利润为优化目标的模块分割式换电站有序充电模型,最后采用CPLEX求解器对该混合整数规划问题进行求解,并结合不同的电价策略加以分析。算例结果表明,在不同的电价策略下,相较于整车式换电站,模块分割式换电站在提高运营净利润方面具有明显的优势,且合理的电价策略能更加充分地发挥换电站的削峰填谷作用。

**关键词:**模块分割式电池;K最邻近算法;换电站;换电模式;充电策略优化;混合整数规划;电动汽车

**中图分类号:**U 469.72

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202003014

## 0 引言

随着化石能源的枯竭和解决环境问题的迫切需要,电动汽车(EV)作为一种高效率、零排放的交通工具受到各国政府、汽车生产商和能源企业的广泛关注,其产业发展也得到了政府的大力支持。但车载电池的使用成本居高不下,成为限制EV发展的一大瓶颈,因此最大化利用车载电池的储能价值和降低电池的使用成本成为现阶段的研究热点之一。

大多数EV在90%的时间处于闲置状态<sup>[1]</sup>,学者们在结合EV运行特性及其储能价值实现经济调度和新能源消纳方面开展了很多研究。在EV经济调度方面,文献[2]建立的双层经济调度模型从EV的时空分布特性上安排其充放电计划,从而实现EV减小网损和削峰填谷的目标;文献[3]以负荷填谷为目标,在虚拟电价的协同机制框架下,与多代理系统(MAS)信息交互机制相结合,采用迭代修正虚拟电价的方法,实现EV有序智能充放电;文献[4]建立了电价联动模型,得到在不同入网方式和电价模式下,EV给发、供两侧带来的效益;文献[5]基于充电需求分类的调度策略,采用粒子群优化算法求解EV调度的最大经济效益。在消纳新能源发电方面,文献[6]建立了EV的集群储能能力的评估模型,并证实了对风电接入电网的平抑控制的有效性;文献[7]提出了包含风、光、储、EV等微电网的经济调度

策略和模型;文献[8]提出了包含EV和光伏阵列智能家居的随机能源管理策略。上述研究均表明EV具有明显的消纳新能源和降低用电成本的作用。

总体而言,已有研究在发挥车载电池的储能功能时,都将EV的储能电池视作一个整体,这一惯性思维限制了EV群体效益的实现。

2010年,丰田发布了一款普锐斯<sup>[9]</sup>插电混合动力车,其做到了以5.2 kW·h的小电池容量来满足驱动汽车行驶的需求;2016年,力帆集团旗下的一款EV——力帆330 EV采用分箱换电<sup>[10]</sup>技术在分时租赁的盼达汽车上实现了以分割电池的形式进行换电。因此,结合小容量电池驱动电机技术和分箱换电技术将大容量电池进行分割后再灵活使用是切实可行的。

为此,本文提出车载电池的模块分割式设计方,并研究该方案下换电站的有序充电策略优化问题。首先,采用K最邻近(KNN)算法拟合得到EV的出行数据;然后,在分析换电站运行特性的基础上,构建以各时刻参与充电的电池数目为控制量,以电池间状态转移关系为主要约束,以换电站年化运营净利润为优化目标的有序充电模型;最后,采用CPLEX求解器对所提混合整数规划模型进行求解。通过算例分析验证了所提模型的优越性。

## 1 EV集群出行模型

### 1.1 EV出行特性

EV充电负荷预测及其充电策略优化是准确建立EV出行模型的基础,本文用最常见私家车于工作日的出行数据库作为分析基础。根据美国家庭出行调查NHTS(National Household Travel Survey)机构2017年的最新数据<sup>[11]</sup>,对私家车在工作日的近

收稿日期:2019-05-05;修回日期:2020-01-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51777077);广东省自然科学基金资助项目(2017A030313304)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51777077) and the Natural Science Foundation of Guangdong Province(2017A030313304)

20 000条出行数据进行分析,可得到出行时间和行驶里程的频数分布图,分别如附录A中图A1和图A2所示。

经研究<sup>[12]</sup>发现,用户们每天的行驶里程符合某一对数正态分布的规律,且其概率密度函数 $f(x)$ 为:

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp[-(\ln x - \mu)^2/(2\sigma^2)] \quad (1)$$

其中, $x$ 为行驶里程; $\mu$ 为行驶里程分布的期望值; $\sigma$ 为行驶里程分布的标准差。

根据式(1)对用户出行数据的概率密度函数进行拟合后,可以计算得到参数的拟合值为: $\sigma=1.10$ , $\mu=2.88$  km。

结果表明,在工作日,25 km以下的短途出行覆盖了70%以上的出行需求,60 km以下的短途出行的覆盖率则达到了90%;私家车的行程开始时刻较为集中,相对而言,行程结束时刻的分布较为分散,两者间也具有部分的交叉。

上述EV出行特性初步决定了模块分割式电池换电站能更加有效地发挥电池的储能价值。

## 1.2 基于KNN算法的EV集群出行模型

目前对EV出行数据的拟合主要是基于概率模型的建立,然后通过蒙特卡洛模拟来获取EV集群的出行特性<sup>[12-13]</sup>。但由于忽略了出行链中变量之间存在的耦合关系,此类方法对EV的实际出行特性的模拟是不够准确的。文献[14]就这一点对EV出行变量之间的耦合关系进行分析,利用独立的相关系数和高斯Copula函数消除出行变量间的耦合关系,从而产生更加准确的出行变量数据。文献[15]采用KNN算法对这种耦合关系进行模糊化处理,拟合效果好,而且算法简单,因而本文也采用KNN算法对EV集群的出行数据进行建模。

KNN算法是一种无需预先假设数据集分布特征的学习算法。首先建立含 $n$ 个数据组的训练集 $T_n = \{(X_i, Y_i)\} (i = 1, 2, \dots, n)$ ,其中 $X_i = [X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{id}]$ 为具有 $d$ 维数据特征的基础向量,其在训练集中对应有一个数据标签 $Y_i$ 。通过给定参数 $K$ 和 $d$ 维待求向量 $x$ ,求解其对应的数据标签 $y$ ,具体步骤如下。

(1)找出距离待求向量 $x$ 最近的 $K$ 个数据组构成邻近集 $T_k$ , $T_k = \{(X'_i, Y'_i)\} (i = 1, 2, \dots, K)$ 。常用欧氏距离来度量连续变量的距离,计算式为:

$$d(x, X'_i) = \sqrt{(x - X'_i)(x - X'_i)^T} \quad (2)$$

(2)依据邻近集 $T_k$ 中的 $K$ 个数据标签 $Y'_i$ 计算得到待求向量 $x$ 对应的数据标签 $y$ 。通常采用 $Y'_i$ 的平均数作为 $y$ ,即:

$$y = \left( \sum_{(X'_i, Y'_i) \in T_k} Y'_i \right) / K \quad (3)$$

基于KNN算法进行EV出行数据拟合的步骤如下。

### (1)行程起始时刻数据拟合。

行程起始时刻变量事实上是与行驶里程变量相耦合的,一般而言起始时刻越晚,对应的日行驶里程也会缩短。对于用户而言,日行驶里程是刚需,所以首先应选取此一维数据作为基础向量 $X_i (d=1)$ ,再选取大数据集内对应的行程起始时刻作为数据标签 $Y_i$ ,从而产生训练集 $T_n$ ;然后根据式(1)所示的概率分布函数拟合产生给定的行驶里程作为待求向量 $x$ ;最后由KNN算法计算得到拟合的行驶里程对应的行程起始时刻 $y$ 。

### (2)行程结束时刻数据拟合。

一般而言,行程起始时刻越晚,日行驶里程越短,行程结束时刻也就越早,所以3个变量间都具有一定的耦合关系。在预测行程结束时刻时,需要将训练集 $T_n$ 中的基础向量 $X_i$ 改为包含日行驶里程和行程起始时刻的二维向量 $X'_i (d=2)$ ,将数据标签 $Y_i$ 改为行程结束时刻 $Y'_i$ ,再根据大数据得到新的训练数据集 $T'_n$ 。将步骤(1)中得到的拟合产生的日行驶里程和计算得到的行程起始时刻作为新的已知待求向量 $x'$ ,然后基于KNN算法计算得到待求向量 $x'$ 对应的行程结束时刻 $y'$ 。

至此,便可以基于KNN算法产生具有耦合关系的完整的拟合行程链(由日行驶里程 $X_i$ 、行程起始时刻 $y$ 和行程结束时刻 $y'$ 组成)。拟合1000辆EV出行数据的结果如图1所示。

可以看出,KNN算法产生的出行链数据所表现的数据特征与实际数据集的特征相同。由于采用KNN算法拟合所得出行链数据之间保留了原本的耦合关系,相较于已有文献中利用蒙特卡洛模拟法拟合产生的数据,其能更加真实地反映行程的特征。

## 2 模块分割式电池换电站的工作模式

模块分割式电池换电站的核心为其电池集中管理系统CBMS(Centralized Battery Manage System)。CBMS主要负责解决群体内每一位用户的出行需求,并对所有的电池模块进行统一的管理,以实现削峰填谷、降低成本等目的。

由于整车的模块化电池是逐一被使用的,所以在车辆归来时需由CBMS根据其被使用的状态进行分类,其中满电的模块可直接换电供给即将出行的车辆使用,而不满电的模块则根据优化后的充电计划进行充电,满电后再供此时需要出行的车辆使用。

在这种集中管理、容量共享的电池管理策略下,电池的利用率和使用寿命均得到了一定程度的提高,用户即时出行的需求也可得到最快的满足,而且为充电策略的优化提供了更大的调整空间,用电成

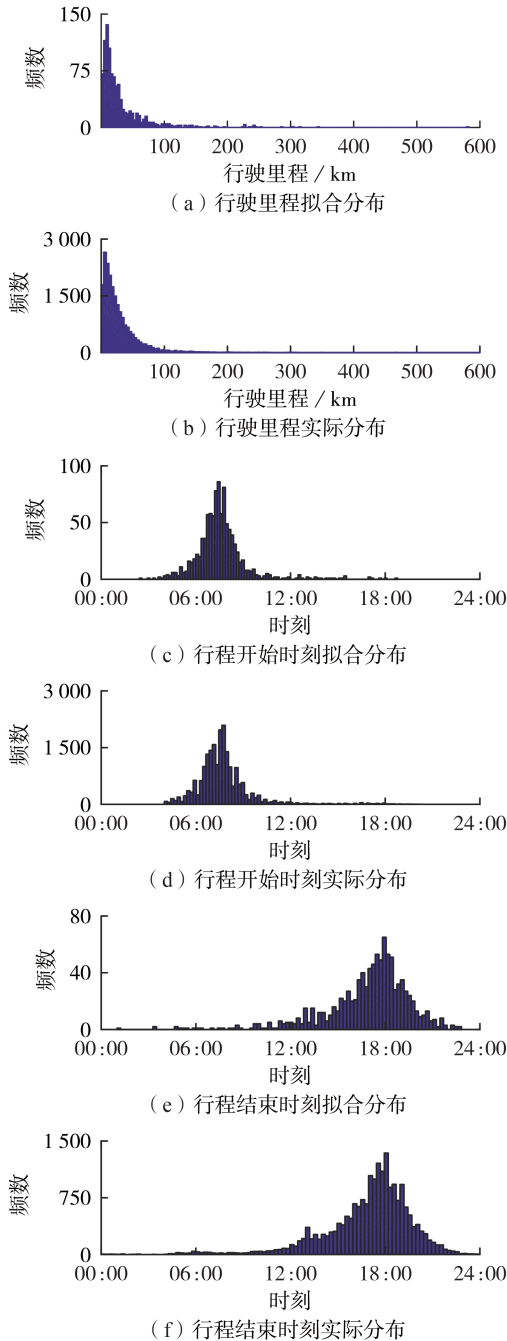


图1 KNN算法的拟合结果与实际数据集的对比  
Fig.1 Comparison between KNN algorithm's fitting results and actual data sets

本也因此可以得到进一步的降低。模块分割式电池换电站的工作模式见图2。

### 3 有序充电模型及其求解算法

#### 3.1 假设前提

(1)换电站内的EV都统一使用同一规格、同一型号的模块电池；

(2)为了不缩短电池的寿命,规定换电站中的电池一旦处于充电状态则必须等到其电量充满才可进行后续操作；

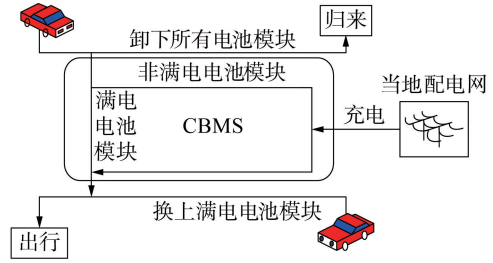


图2 模块分割式电池换电站的工作模式  
Fig.2 Operation mode of swapping station with modular split batteries

(3)电池的充电方式采用恒功率充电模式。

#### 3.2 约束条件

根据图2所示换电站的工作模式,可以列出在换电站工作过程中各变量间满足以下约束。

(1)状态转移约束。

电池的状态转移关系如图3所示。由图3可知,相关约束的表达式如下:

$$n_{full}(t) = n_{full}(t-1) + n_{in\_full}(t) - mn_{out}(t) + n_{f\_new}(t) \quad (4)$$

$$n_{wait}(t) = n_{wait}(t-1) + n_{in\_wait}(t) - n_{c\_new}(t) \quad (5)$$

$$n_{charging}(t) = n_{charging}(t-1) + n_{c\_new}(t) - n_{f\_new}(t) \quad (6)$$

$$n_{c\_new}(t) = n_{f\_new}(t - T_{cl}) \quad (7)$$

$$P_c(t) = n_{charging}(t)P_{per} \quad (8)$$

其中,  $n_{full}(t)$ 、 $n_{wait}(t)$ 、 $n_{charging}(t)$  分别为  $t$  时刻满电、待充电、正在充电的电池模块数量;  $m$  为单辆EV的电池分割模块数量;  $n_{out}(t)$  为  $t$  时刻需要出行的EV数量;  $n_{in\_wait}(t)$ 、 $n_{in\_full}(t)$  分别为  $t$  时刻结束行程的EV带进系统的待充电、满电电池模块数量;  $n_{c\_new}(t)$ 、 $n_{f\_new}(t)$  分别为  $t$  时刻新进充电状态和满电状态的电池模块数量;  $T_{cl}$  为单个电池模块充满电所需要的时间;  $P_{per}$  为单个电池模块的额定充电功率;  $P_c(t)$  为  $t$  时刻整座换电站的实时充电功率。其中  $n_{in\_full}(t)$ 、 $n_{in\_wait}(t)$  和  $n_{out}(t)$  均是由EV出行数据的拟合结果计算得到的。

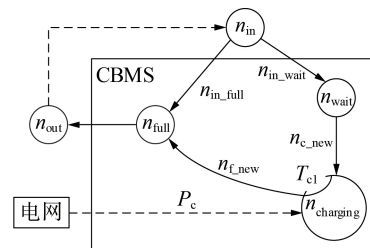


图3 电池的状态转移关系图  
Fig.3 State transition diagram of batteries

(2)持久运行约束。

系统能够持久稳定运行的条件是满电电池模块的数量在一天的始、末时刻相等,且待充电电池模块的数量在一天的始末、时刻也相等,即:



$$n_{\text{full}}(t_0) = n_{\text{full}}(t_{\text{end}}) \quad (9)$$

$$n_{\text{wait}}(t_0) = n_{\text{wait}}(t_{\text{end}}) \quad (10)$$

其中,  $n_{\text{full}}(t_0)$ 、 $n_{\text{wait}}(t_0)$  分别为一天开始时刻对应的满电电池模块数量、待充电电池模块数量;  $n_{\text{full}}(t_{\text{end}})$ 、 $n_{\text{wait}}(t_{\text{end}})$  分别为一天结束时刻对应的满电电池模块数量、待充电电池模块数量。

(3) 不等式约束。

$$n_{\text{full}}(t) \geq 0, n_{\text{wait}}(t) \geq 0, n_{\text{charging}}(t) \geq 0 \quad (11)$$

$$0 \leq P_c(t) \leq P_m \quad (12)$$

$$(n_{\text{full}}(t) + n_{\text{wait}}(t) + n_{\text{charging}}(t))/m \leq n_{\text{all}} \quad (13)$$

其中,  $n_{\text{all}}$  为 CBMS 正常运行时所需要的整车电池数量;  $P_m$  为充电站充电功率的设计上限。  $n_{\text{full}}(t) \geq 0$  表示满电电池模块数量可以满足出行需要, 结合  $n_{\text{wait}}(t) \geq 0$  和  $n_{\text{charging}}(t) \geq 0$ , 则是整个 CBMS 可以正常运行的约束条件。

### 3.3 目标函数

本文以最大化换电站的年化运营净利润为目标。根据换电站的工作模式分析可知, 其运营净利润主要由年化后的售电毛利、建设成本以及电池使用成本三部分组成。

(1) 售电毛利。

换电站通常从电网购电, 并向消费者收取一定的充电电费、充电服务费和电池租用费, 因此换电站的年化后的售电毛利应该由充电电费、充电服务费、电池租用费之和减去购电电费, 即:

$$F_1 = \sum_{t=1}^T 365(p_1(t) + p_{\text{ic}}(t) + p_{\text{ib}}(t) - p_2(t))P_c(t)\Delta t \quad (14)$$

其中,  $\Delta t$  为优化时段间隔, 单位为 h;  $T$  为日内总时段数;  $p_1(t)$ 、 $p_{\text{ic}}(t)$ 、 $p_{\text{ib}}(t)$ 、 $p_2(t)$  分别为换电站在  $t$  时刻收取的充电电费、充电服务费、电池租用费和购电电费的单价, 单位为元 / (kW·h)。

(2) 建设成本。

换电站的建设成本主要包括设备成本、运维成本和用地成本, 故年化后的建设成本的表达式为:

$$F_2 = (C_i + C_m + S_o P_1)P_m \quad (15)$$

其中,  $C_i$ 、 $C_m$  分别为年化后的单位充电功率所需的设备(不含电池)成本、运维成本, 单位为元 / kW;  $S_o$  为单位充电功率所占的用地面积, 单位为  $\text{m}^2 / \text{kW}$ ;  $P_1$  为年化后的单位面积的用地成本, 单位为元 /  $\text{m}^2$ 。

(3) 电池使用成本。

电池的使用成本由购置成本和使用寿命决定。其中购置成本主要由电芯和 Pack 成本组成。电池的 Pack 成本只占整个电池包的 20%, 而不同的 Pack 技术之间的成本差异最高约为 25%, 因此将 Pack 模式改为分割式最多增加 5% 的购置成本。

电池的使用寿命与其设定的放电深度、充放电

功率和环境温度相关, 在一定的充电次数后, 电池的性能就无法满足 EV 使用的需要而进入回收利用阶段。文献[16]的研究表明, 在高荷电状态(SOC)区间运行的电池, 其容量衰减速度比在低 SOC 区间运行的电池快, 而私家车以短途出行为主的出行规律决定了整车充电方式, 使得 EV 电池长时间处于高 SOC 区间的浅充 / 浅放状态, 严重缩短了 EV 电池的使用寿命。分割式电池工作时, 单个电池模块的放电深度会更高, 电池容量因此衰减得慢, 其寿命循环次数会更高。

因此, 可得到年均使用成本的表达式为:

$$F_3 = n_{\text{all}}(B_i - B_r)C_{\text{times}}/C_{\text{atimes}} \quad (16)$$

其中,  $B_i$  为整车电池初始购买价格, 单位为元 / 个;  $B_r$  为整车电池的回收价格, 单位为元 / 个;  $C_{\text{times}}$  为电池在设计寿命内可以接受的充电次数;  $C_{\text{atimes}}$  为电池的年充放电循环次数。

综上, 换电站年化运营净利润的目标函数为:

$$\max F = F_1 - F_2 - F_3 \quad (17)$$

### 3.4 求解算法

本文所提有序充电模型实际上是一个混合整数规划模型, 且模型中各变量间的耦合关系复杂, 传统的优化算法不能满足其求解要求。目前, 大多文献采用各类仿生算法进行求解, 如遗传算法、粒子群优化算法、人工神经网络等, 但这些算法在求解混合整数规划模型时, 容易陷入局部最优, 且求解时间较长。因此, 有必要寻求更加合适的算法来求解此类问题。

CPLEX<sup>[17]</sup> 是 IBM 公司开发的一个非常强大和先进的优化问题求解器, 其内置的对偶单纯形法优化器、主单纯形法优化器、内点优化器、混合整数优化器可以用于求解各类线性规划、二次规划、二阶锥规划及混合整数规划问题, 且其并行优化器还能大幅提高求解速度。

鉴于此, 本文使用 CPLEX 求解器对所提有序充电模型进行求解。在 MATLAB 中添加 Yalmip 工具箱<sup>[18]</sup> 和 CPLEX 求解器后, 便可以通过定义变量、设定约束条件和确定目标函数这 3 个步骤方便快捷地使用 CPLEX 求解本文所提混合整数规划模型。

### 3.5 计算流程

综上所述, 模块分割式电池换电站有序充电模型的求解流程如图 4 所示。

## 4 算例仿真及优化效果对比

### 4.1 仿真参数设置

整车式换电站的有序充电模型大多以充电功率为控制对象<sup>[19]</sup>, 或以参与充电的整车电池数量为控制对象<sup>[20]</sup>, 前者的控制对象在现实中难以灵活实现, 后者的控制对象又不够精细化。本文以文献[20]构

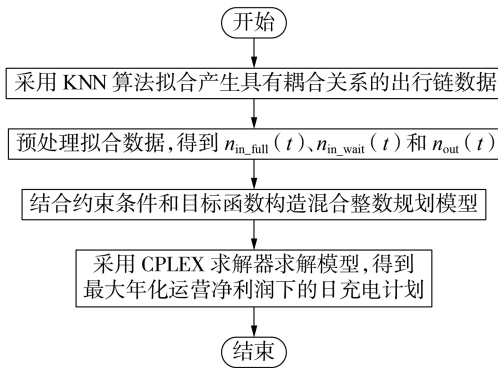


图4 换电站有序充电模型的求解流程

Fig.4 Flowchart of solving ordered charging model of battery-swapping station

建的整车换电模型为例,分别对模块分割式与整车式换电站的有序充电模型进行优化求解和对比。

为了统一对比优化效果,仿真算例中将采用相同的假设前提、约束条件、目标函数和求解方法。对EV剩余电量采用一致的模糊化处理方法,即采用相同的分割模块数 $m_{split}$ 与最高荷电等级 $m_{soc}$ ,均取值为6。单个分割模块与荷电等级为1的整车电池的充电时间相同,因此在表示分割模块的充电计划中,将其统一等效表示为等级1。荷电等级的划分见附录B中表B1。

仿真模型基础参数如下。①EV的相关参数:整车最佳放电深度对应的续航里程为200 km,采用 $P_{per}=3.5$  kW的小功率交流慢充模式,EV每行驶100 km的能耗为 $15$  kW·h。②各类成本参数: $C_i=728$ 元/kW, $C_m=180$ 元/kW, $S_o=0.5$  m<sup>2</sup>/kW, $P_i=1500$ 元/m<sup>2</sup>, $B_r=20000$ 元/个, $C_{atimes}=95$ ;对于整车式换电站, $B_i=100000$ 元/个, $C_{times}=2000$ ;对于分割式换电站, $B_i=105000$ 元/个, $C_{times}=2500$ 。③电价参数设置如下: $p_1(t)$ 采用实时电价,即电价随负荷曲线一致变化,实时电价曲线见附录C中图C1; $p_2(t)$ 可采用分时电价或者固定电价,分时电价曲线见附录C中图C1; $p_{fc}(t)=0.5$ 元/(kW·h); $p_{bc}(t)=0.8$ 元/(kW·h)。

$p_1(t)$ 与 $p_2(t)$ 间的价差为换电站运营商接触到的实际电价信息。可看出,当 $p_2(t)$ 采用分时电价时,并不总是有利于引导换电站配合电网的削峰填谷,例如价差最大的时刻处于第一个峰时电价时段,而此时的负荷水平也比较高,引导换电站进行充电是不太合理的,因此为了研究换电站在合理电价策略引导模式下的充电行为,本文增加了对用户侧收取固定电价的情形进行分析,使得换电站运营商接触到的电价信息与负荷水平变化信息保持一致,固定电价取分时电价的均值,即 $p_2(t)=0.6$ 元/(kW·h)。

#### 4.2 仿真及优化结果对比

本文以一个含有1000辆私家车的居民小区为

具体算例,取15 min为一个时段,即 $\Delta t=0.25$  h, $T=96$ 。下文对用户侧采取不同电价策略的情形分别进行仿真计算。

##### (1)情形1: $p_2(t)$ 采用分时电价。

根据图4所示求解流程,可以得到3种充电模式(模式1为整车式无序充电,模式2为整车式有序充电,模式3为模块分割式有序充电)下为了满足同一出行需求的EV用户群某日各时刻进入充电的电池数量计划,如附录D中图D1所示。由图可看出,2种有序充电模式(模式2和模式3)具有如下共同特点:①都是将集中到达的EV的电池分散到其他空闲时刻进行充电;②都尽量使充电设备能连续工作,即充满一个电池后可以紧接着开始下一个电池的充电工作。

上述2个特点均可以使充电设备的利用水平更高,从而起到降低建设成本和达到削峰填谷的作用。

取原区域负荷峰值水平为6000 kW,可进一步得到3种充电模式下的负荷曲线如图5所示。

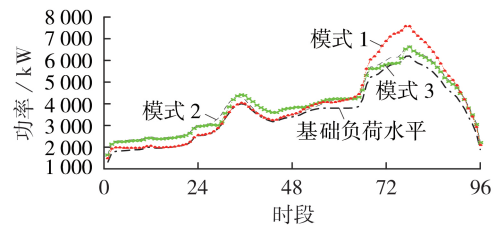


图5 基于分时电价的3种充电模式下负荷曲线对比

Fig.5 Comparison of load curves among three charging modes based on TOU electricity price

由图5可以看出,2种有序充电模式均明显改善了无序充电模式下由于EV集中到达而导致的负荷曲线“峰上加峰”的负面效应。

分时电价情形下3种充电模式的收益对比如表1所示。

表1 基于分时电价的3种充电模式下收益对比

Table 1 Comparison of profit among three charging modes based on TOU electricity price

充电模式	售电毛利 / 万元	建设成本 / 万元	电池使用成本 / 万元	运营净利润 / 万元
1	414.81	223.16	517.02	-325.37
2	433.99	76.60	350.36	7.03
3	439.87	66.10	297.07	76.70

由表1结果可以看出,在分时电价情形下,采用有序充电模式可以明显降低建设成本和电池使用成本,从而提高换电站的运营净利润(330~400万元),其中模块分割式有序充电模式的运营净利润比整车式有序充电模式多70万元左右。

##### (2)情形2: $p_2(t)$ 采用固定电价。

同样地,根据图4所示求解流程,可以得到3种

充电模式下为了满足同一出行需求的EV用户群某日各时刻进入充电的电池数量计划,如附录D中图D2所示。优化后3种充电模式下的负荷曲线见图6,收益对比见表2。

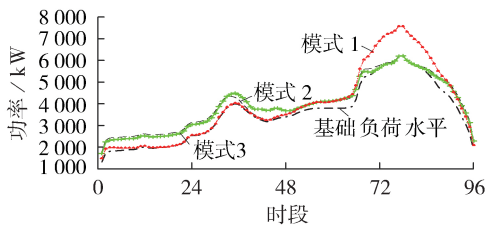


图6 基于固定电价的3种充电模式下负荷曲线对比

Fig.6 Comparison of load curves among three charging modes based on fixed electricity price

表2 基于固定电价的3种充电模式下收益对比

Table 2 Comparison of profit among three charging modes based on fixed electricity price

充电模式	售电毛利 / 万元	建设成本 / 万元	电池使用成本 / 万元	运营净利润 / 万元
1	339.61	223.16	517.02	-400.57
2	435.10	92.27	350.36	-7.53
3	441.54	86.96	294.20	60.38

从表2结果可看出,在固定电价情形下,采用有序充电模式可同样为换电站提高330~400万元左右的运营净利润,其中模块分割式有序充电模式的运营净利润比整车式有序充电模式提高约68万元,但由于建设成本的提高,固定电价情形下的年均运营净利润较分时电价情形增加了15万元左右。

由于对用户侧采用固定电价后,换电站运营接触到的价格信息是与实时负荷水平完全一致的,所以其优化结果对改善负荷曲线更加有效。仿真结果表明:在分时电价情形下,模式3可以使得区域负荷标准差、峰谷差和峰值分别下降23.39%、20.19%、12.29%;而在固定电价情形下,模式3可以使得区域的负荷标准差、峰谷差和峰值分别下降32.23%、29.69%、17.49%。可以发现,合理的电价策略能更加充分地引导有序充电行为,以实现其对区域负荷的削峰填谷目标。

## 5 结论与展望

本文以模块电池数量为控制量、以电池间状态转移关系为主要约束条件,建立了以换电站年运营净利润为优化目标的有序充电模型,并采用CPLEX求解器进行求解。结果表明:

(1)KNN算法可以有效地用于拟合EV的出行链数据;

(2)有序充电在提高换电站售电利润的同时能极大地降低各类成本,相较于整车式有序充电模式,模块分割式有序充电模式能进一步增加约1.3%的

售电利润,节约14%的建设成本和16%的电池使用成本,从而提高换电站的运营净利润;

(3)合理的电价策略能更加充分地引导有序充电行为,从而更好地发挥其对区域负荷的削峰填谷功效。

本文尚未对最佳的分割模块数量和电价联动方案进行研究,也未计及车网互动(V2G)技术和辅助市场获利情景下优化后的换电站充放电计划及其收益表现,下一步的工作将进一步丰富模型进行研究。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] KEMPTON W, LETENDRE S E. Electric vehicles as a new power source for electric utilities[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 1997, 2(3): 157-175.
- [2] 张谦, 刘超, 周林, 等. 计及可入网电动汽车最优时空分布的双层经济调度模型[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(20): 40-45. ZHANG Qian, LIU Chao, ZHOU Lin, et al. A bi-level economy dispatch model considering temporal and spatial optimal distribution of electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(20): 40-45.
- [3] 于娜, 于飞, 黄大为, 等. 基于多代理系统的电动汽车充放电分布式协同调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(5): 1-9. YU Na, YU Fei, HUANG Dawei, et al. Multi-agent system based charging and discharging of electric vehicles distributed coordination dispatch strategy[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5): 1-9.
- [4] 施泉生, 平宗飞, 陈敏骏. 计及电动汽车入网的电价联动模型[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(11): 34-40. SHI Quansheng, PING Zongfei, CHEN Minjun. Electricity price linkage model considering V2G[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(11): 34-40.
- [5] 戴欣, 袁越, 王敏, 等. 配网中电动汽车调度策略及其经济效益评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(3): 42-47. DAI Xin, YUAN Yue, WANG Min, et al. Scheduling strategy and economic benefits evaluation of electric vehicles in distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(3): 42-47.
- [6] 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): 211-219. 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): 211-219.
- [7] 茆美琴, 孙树娟, 苏建徽. 包含电动汽车的风/光/储微电网经济性分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 30-35. MAO Meiqin, SUN Shujuan, SU Jianhui. Economic analysis of a microgrid with wind/photovoltaic/storages and electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 30-35.
- [8] WU X H, HU X S, MOURA S, et al. Stochastic control of smart home energy management with plug-in electric vehicle battery energy storage and photovoltaic array[J]. Journal of Power Sources, 2016, 333: 203-212.
- [9] 彭斐. 丰田第三代普锐斯混合动力车重装上阵[J]. 汽车与配件, 2012(15): 31-33.
- [10] 周远喆, 许剑, 李雪松. 多车型换电站可行性研究[J]. 汽车工



- 业研究,2019(1):61-64.
- [11] U. S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. 2017 national household travel survey[EB/OL]. [2019-04-05]. <http://nhts.ornl.gov>.
- [12] 陈丽丹, 聂涌泉, 钟庆. 基于出行链的电动汽车充电负荷预测模型[J]. 电工技术学报, 2015, 30(4): 216-225.  
CHEN Lidan, NIE Yongquan, ZHONG Qing. A model for electric vehicle charging load forecasting based on trip chains [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(4): 216-225.
- [13] 王浩林, 张勇军, 毛海鹏. 基于时刻充电概率的电动汽车充电负荷预测方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3): 207-213.  
WANG Haolin, ZHANG Yongjun, MAO Haipeng. Charging load forecasting method based on instantaneous charging probability for electric vehicles[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 207-213.
- [14] LOJOWSKA A, KUROWICKA D, PAPAETHYMIU G, et al. From transportation patterns to power demand: stochastic modeling of uncontrolled domestic charging of electric vehicles [C]//2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting. Detroit, MI, USA: IEEE, 2011: 1-7.
- [15] LI M Y, LENZEN M, KECK F, et al. GIS-based probabilistic modeling of BEV charging load for Australia[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 3525-3534.
- [16] 徐成善, 卢兰光, 任东生, 等. 车用锂离子电池放电区间与容量衰减关系的研究[J]. 汽车工程, 2017, 39(10): 1141-1144, 1210.  
XU Chengshan, LU Languang, REN Dongsheng, et al. A study on the relationship between capacity fade and discharge intervals of a vehicular lithium-ion battery[J]. Automotive Engineering, 2017, 39(10): 1141-1144, 1210.
- [17] IBM. IBM ILOG CPLEX[EB/OL]. (1999-07-01)[2019-04-05]. <http://www-01.ibm.com/software/integration/optimization/cplex-optimizer/>.
- [18] LÖFBERG J. Yalmip [EB/OL]. (2004-07-01) [2019-04-05]. <https://yalmip.github.io/>.
- [19] 田文奇, 和敬涵, 姜久春, 等. 电动汽车换电站有序充电调度策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(21): 114-119.  
TIAN Wenqi, HE Jinghan, JIANG Jiuchun, et al. Research on dispatching strategy for coordinated charging of electric vehicle battery swapping station[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(21): 114-119.
- [20] 黄敏丽, 于艾清. 基于改进布谷鸟算法的电动汽车换电站有序充电策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(4): 1075-1083, 1284.  
HUANG Minli, YU Aiqing. Study on coordinated charging strategy for battery swapping station based on improved cuckoo search algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(4): 1075-1083, 1284.

#### 作者简介:



毛海鹏

毛海鹏(1994—),男,安徽铜陵人,硕士研究生,主要研究方向为电动汽车及其储能技术(E-mail: 1021639323@qq.com);

张勇军(1973—),男,广东河源人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统无功规划与电压控制、能源互联网的优化运行等(E-mail: zhangjun@scut.edu.cn);

王浩林(1994—),男,江西吉安人,硕士研究生,主要研究方向为电动汽车充放电(E-mail: 524823832@qq.com)。

(编辑 陆丹)

## Charging strategy optimization of swapping station based on modular split batteries

MAO Haipeng<sup>1</sup>, ZHANG Yongjun<sup>1</sup>, WANG Haolin<sup>1</sup>, YI Yingqi<sup>2</sup>

(1. Research Center of Smart Energy Technology, School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Guangzhou Power Electrical Technology Co., Ltd., Guangzhou 511475, China)

**Abstract:** The battery-swapping mode is an indispensable energy supply mode for electric vehicles due to its advantages of convenient and unified management and quick traveling. It is of great significance for the development of swapping stations to give full play to the advantages of battery-swapping mode for ordered charging. The KNN( $K$  Nearest Neighbor) algorithm is used to fit the travel data considering the coupling relationship among variables. On this basis, the ordered charging model of swapping station based on modular split batteries is established with the state transition relationship among batteries as the main constraint and the station operation net profit as the optimization objective. CPLEX solver is used to solve this mixed integer programming problem, and different electricity price strategies are analyzed. The example results show that, compared with the whole-vehicle swapping station, the modular split batteries-based swapping station has an obvious advantage in improving the operation net profit under different electricity price strategies, and the reasonable electricity price strategy can give full play to peak-load shifting effect of the swapping station.

**Key words:** modular split batteries; KNN algorithm; swapping station; battery-swapping modes; charging strategy optimization; mixed integer programming; electric vehicles

## 附录 A

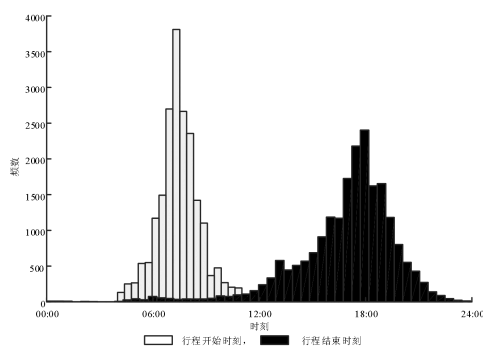


图 A1 工作日出行时间频数分布  
Fig.A1 Distribution of travel time on weekday

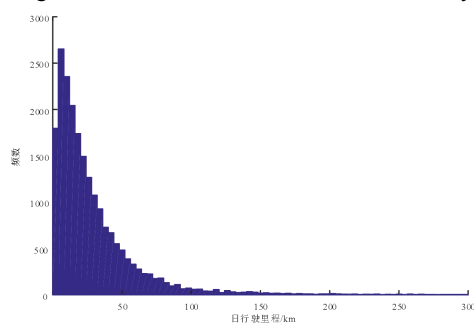


图 A2 工作日日行驶里程频数分布  
Fig.A2 Distribution of daily mileage on weekday

## 附录 B

表 B1 电池荷电等级划分  
Table B1 Division of battery SOC

等级	SOC 范围
1	(5/6, 1]
2	(2/3, 5/6]
3	(1/2, 2/3]
4	(1/3, 1/2]
5	(1/6, 1/3]
6	[0, 1/6]

## 附录 C

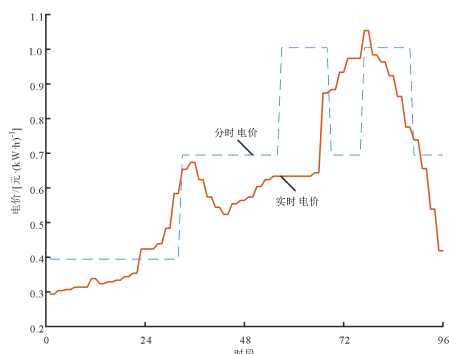


图 C1 电价曲线  
Fig.C1 Electricity price curves



# 附录 D

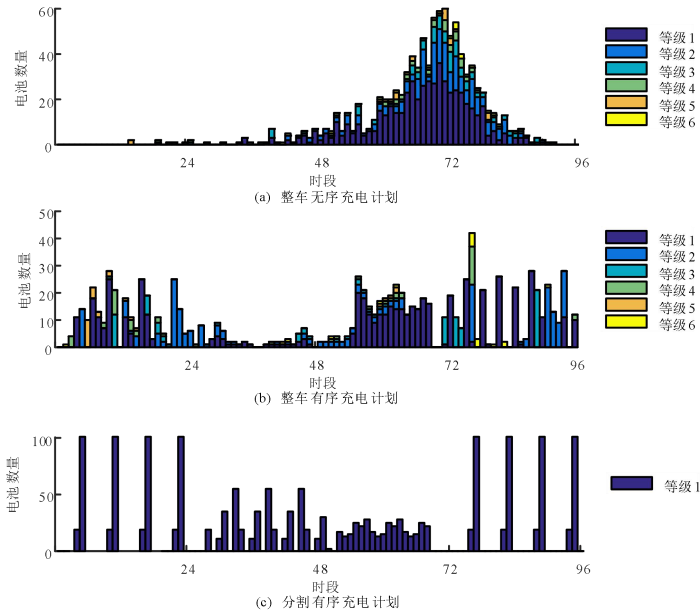


图 D1 基于分时电价的充电计划对比

Fig.D1 Charging plan comparison based on TOU electricity price

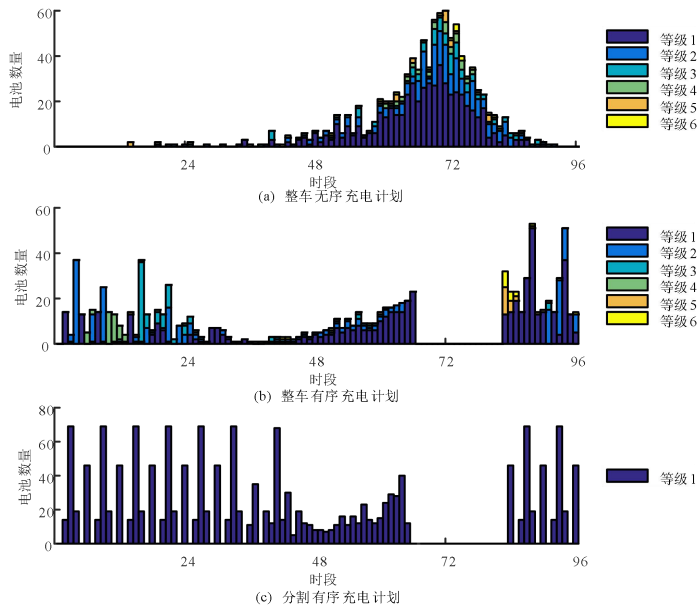


图 D2 基于固定电价的充电计划对比

Fig.D2 Charging plan comparison based on fixed electricity price