

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.04.006

# 基于双向出行链的电动汽车平抑电网波动策略

王宜立<sup>1</sup>, 张蓉馨<sup>2</sup>, 杨再鹤<sup>1</sup>, 单祖植<sup>1</sup>, 徐晓亮<sup>3</sup>, 吕广强<sup>4</sup>

(1. 云南电力调度控制中心, 云南 昆明 650011; 2. 云南电网有限责任公司文山供电局, 云南 文山 663099; 3. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102; 4. 南京理工大学自动化学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:**针对电动汽车(electric vehicle, EV)时空转移随机性造成的电网波动问题, 计及车主的性别差异、车主实时出行目的地不同和车辆双向行驶, 提出了一种基于出行随机性双向出行链的EV充放电调度策略。考虑车主实际出行过程, 建立EV双向出行链模型; 考虑到男女车主出行过程中的性别差异, 确定男女实时出行概率模型; 以降低电网的波动为目标函数, 考虑车主实时出行需求和EV实时荷电状态(state of charge, SOC)建立调度模型, 并依据所建立模型对EV进行充放电调度。在约280 m<sup>2</sup>的区域进行仿真分析, 结果表明: 双向出行链模型更接近用户实际出行规律, 其调度策略能够在满足用户实际出行需求的同时, 更好地抑制电网波动性。

**关键词:**电动汽车(EV); 双向出行链; 电网波动; 车辆到电网(V2G); 充放电调度; 荷电状态(SOC)

中图分类号: TM73

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2023)04-0050-11

## 0 引言

随着电动汽车(electric vehicle, EV)数量的稳步增长, 充电负荷占比逐渐增大<sup>[1]</sup>。由于用户行程和充电行为的不确定性及电池容量等问题<sup>[2-3]</sup>, 大量EV接入电网会影响电网运行的稳定性。为了解决EV充电负荷时空随机性和波动性等带来的问题<sup>[4-6]</sup>, 可利用车辆到电网(vehicle-to-grid, V2G)技术与智能电网相结合, 通过对EV的充放电行为进行有序控制, 达到平抑电网波动的目的<sup>[7]</sup>。

在EV充放电负荷时空随机性的研究方面, 文献[8-9]给出了EV充电负荷的时空分布, 但在车主第一次出发时就确定了其全天时空分布, 未对EV空间转移概率进行分析; 文献[10]在考虑用户一天内的出行序列时, 采用EV单向出行概率模型, 未考虑实际过程中用户在两地之间的往返情况; 文献[11]构建剩余电量与毗邻行程所需电量的联合概率分布, 但仅考虑了EV充电行为, 而未对其放电行为进行分析; 文献[12]考虑了用户出行特性和V2G的时空分布, 但是其出行链是随机抽取的, 未考虑车主不同时刻和不同性别造成的出行差异。因此对于EV充放电的时空特性有待进一步研究。

在EV充放电调度策略方面, 文献[13-14]在对EV进行充放电调度时, 将其调度下限设定为统一值, 调度后存在不满足用户接下来的行驶需求的情

况, 同时忽略了不同用户实际行驶的差异性; 文献[15]建立了考虑EV充放电的大规模集群实时优化调度模型, 但仍要配电网集中划分集群并制定调度计划, 对实时通信能力要求较高, 且未考虑集群内部的单辆EV的能量分配; 文献[16]考虑了住宅区EV的有序充电问题, 对于EV的调度, 须综合考虑其实际行驶区域。因此, 在EV进行充电调度时, 有必要考虑用户的行驶差异性和电动汽车的充放电特性。

综上所述, 为了更好地调度EV充放电以平抑电网波动, 文中考虑EV用户在实际出行过程中可能出现的往返行驶、车主实时行驶需求以及由于车主性别不同造成的行驶差异等因素, 建立了EV双向出行链模型; 将该出行链模型应用于EV充放电调度策略, 分析并验证文中出行链模型的正确性以及基于该模型的充放电调度对电网波动抑制的有效性。

## 1 EV双向出行链模型

目前, 大多数研究在利用出行链模型对用户出行轨迹进行模拟时, 在一天内初始出发时就确定了车主的出行目的地, 且均假设EV为单向行驶, 并未考虑车辆在两地之间往返的情况。文中在考虑车主实时行驶需求的基础上, 计及车主性别差异, 建立了EV双向出行链模型。

### 1.1 基本出行链

出行链描述的是居民基于出行目的, 自起始点出发, 在一定时间顺序上依次经过若干目的地, 最

收稿日期: 2022-11-23; 修回日期: 2023-03-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52007082)

终到达终点结束全部出行的过程<sup>[17]</sup>,其包含时间和空间上相互联系的变量。基本出行链分为简单出行链(只有一个中途活动)和复杂出行链,如图1所示,其中H表示住宅区;W表示工作区;E表示休闲区。

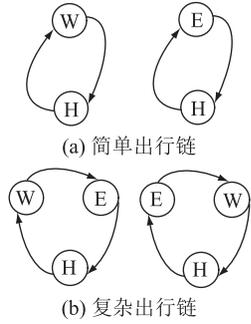


图1 基本出行链

Fig.1 Basic travel chain

## 1.2 双向出行链模型

文中考虑EV的双向行驶,从车主性别差异、车主行驶目的地概率分析以及车辆的双向流动三方面建立双向出行链模型。与现有研究不同,文中出行链是根据其出发地点和出发时刻确定的,不是在初始出发时确定。

### 1.2.1 车主性别差异

男女车主的差异会造成对下一目的地的选择不同。根据国家家庭旅行调查(national household travel survey, NHTS)的数据筛选和统计<sup>[18]</sup>,分析了出行目的地的区别,如图2所示。

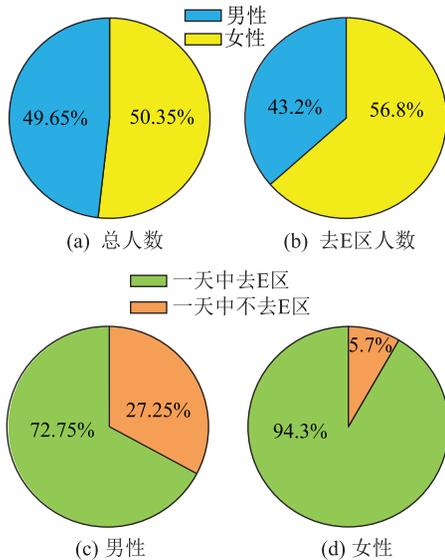


图2 男性与女性的出行情况

Fig.2 Travel situation of male and female

由图2可知,在男女车主去E区的选择上存在较大差别,男性约占43.2%,女性约占56.8%;其中一天中去E区的男性占男性总人数的72.75%,女性

则为94.3%。可见女性与男性在进行目的地选择时是有区别的,所以文中在出行目的选择方面考虑了男女车主的性别差异。

### 1.2.2 车主出行目的地概率分析

根据车主性别、出发地点和时间,按式(1)可以得到实时行驶目的地:

$$\mathbf{d}_{g,t,n} = \begin{bmatrix} P_{11,g,t} & P_{12,g,t} & P_{13,g,t} \\ P_{21,g,t} & P_{22,g,t} & P_{23,g,t} \\ P_{31,g,t} & P_{32,g,t} & P_{33,g,t} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{d}_{g,t,n}$ 为 $g$ 车主在 $t$ 时第 $n$ 次出行目的地,其行和列地点均为H、W和E区; $g$ 为车主性别; $P_{ij,g,t}$ 为 $g$ 车主在 $t$ 时从 $i$ 地点可能去往 $j$ 地的概率,其计算如式(2)所示。

$$P_{ij,g,t} = \frac{M_{ij,g,t}}{M_{i,g,t}} \quad (2)$$

式中: $M_{i,g,t}$ 为 $g$ 车主 $t$ 时在 $i$ 处所有行程数量的总和; $M_{ij,g,t}$ 为 $g$ 车主 $t$ 时在 $i$ 处下一行程为 $j$ 的数量。

$P_{ij,g,t}$ 须满足式(3)所述条件。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{ij,g,t} \leq 1 & i \neq j \\ P_{ij,g,t} = 0 & i = j; i, j = 1, 2, \dots, n \\ \sum_{j=1}^n P_{ij,g,t} = 1 \end{cases} \quad (3)$$

### 1.2.3 双向出行链

根据1.2.2节分析,在考虑车主性别差异和出行目的地的动态确定的基础上,建立双向出行链模型,如图3所示。

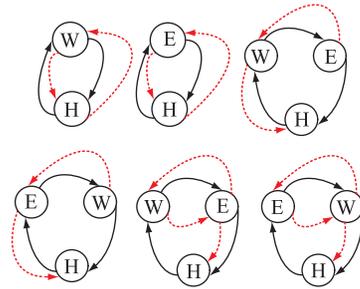


图3 双向出行链

Fig.3 Two-way travel chain

图3中的实线为基本出行链的路线,虚线为增加的出行路线。由图3可知,双向出行链模型在基本出行链的基础上增加了可能的出行路线,考虑了下一出行目的地的动态特性,更符合实际出行规律。

## 2 EV出行模型

### 2.1 道路模型与行驶路径

设该区域道路均为双向,采用图论对交通路网建模<sup>[19]</sup>,则道路拓扑如图4所示。

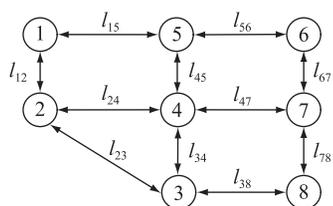


图4 简单道路拓扑

Fig.4 Simple road topology

设道路地点数为  $m$  ( $m = 1, 2, 3, \dots$ ), 路径用  $l_{ij}$  表示, 其中  $i, j = 1, 2, \dots, m$ , 即可能出行的目的地, 则图4所示的道路关系可用一个  $m \times m$  阶的邻接矩阵  $D$  表示。该矩阵由元素  $d_{ij}$  构成, 其表示如下:

$$d_{ij} = d_{ji} = \begin{cases} l_{ij} & i \neq j \text{ 且 } i \text{ 与 } j \text{ 有连接} \\ 0 & i = j \\ \infty & i \neq j \text{ 且 } i \text{ 与 } j \text{ 无连接} \end{cases} \quad (4)$$

则邻接矩阵  $D$  可表示为:

$$D = \begin{bmatrix} 0 & l_{12} & \infty & \infty & l_{15} & \infty & \infty & \infty \\ l_{21} & 0 & l_{23} & l_{24} & \infty & \infty & \infty & \infty \\ \infty & l_{32} & 0 & l_{34} & \infty & \infty & \infty & l_{38} \\ \infty & l_{42} & l_{43} & 0 & l_{45} & \infty & l_{47} & \infty \\ l_{51} & \infty & \infty & l_{54} & 0 & l_{56} & \infty & \infty \\ \infty & \infty & \infty & \infty & l_{65} & 0 & l_{67} & \infty \\ \infty & \infty & \infty & l_{74} & \infty & l_{76} & 0 & l_{78} \\ \infty & \infty & l_{83} & \infty & \infty & \infty & l_{87} & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

根据常用的路径规划 Dijkstra 算法<sup>[20]</sup>, 由图4可得路径集合  $L$ :

$$L = \sum l_{ij,g} \quad (6)$$

式中:  $l_{ij,m}$  为从地点  $i$  至  $j$  第  $g$  种路径。

对于路径规划, 车辆每次启动时, 车主依照当前道路状况和用户实时出行目的规划最佳路径, 如式(7)所示。

$$T_{ij,g} = l_{ij,g} / v_{ij,g} \quad (7)$$

式中:  $v_{ij,g}$ 、 $T_{ij,g}$  分别为第  $g$  种从  $i$  至  $j$  路径的汽车行驶速度和所需时间。

## 2.2 车主行驶随机性分析

### 2.2.1 初始出行时间

对于车辆初始出行时间  $t_1$ , 采用正态分布  $t_1 \sim N(\mu_1, \delta_1^2)$  进行描述<sup>[21-25]</sup>, 如式(8)所示。

$$f_{t_1}(x) = \frac{1}{\delta_1 \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - \mu_1)^2}{2\delta_1^2}\right) \quad (8)$$

式中:  $\mu_1 = 7.62$ ;  $\delta_1 = 2.14$ 。

由式(8)可得初始出行时间, 如图5所示。由图5可知, 出发时间集中在早上7时左右, 与实际情况相符。

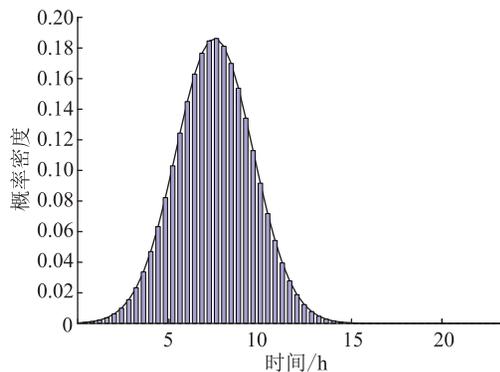


图5 初始出行时间概率

Fig.5 First departure time probability

### 2.2.2 行驶时间

考虑了车辆行驶时间会受到道路等级、交通拥堵情况和车主出行时段等因素影响, 车辆在某一路段行驶时间如式(9)所示。

$$\Delta \bar{T}_r = L_r / \bar{V}_r \quad (9)$$

式中:  $\Delta \bar{T}_r$  为 EV 通过段路  $r$  所需时间;  $L_r$  为段路  $r$  的长度;  $\bar{V}_r$  为考虑交通等因素之后 EV 在段路  $r$  的平均行驶速度。

EV 从当前所在地  $i$  行驶至下一个目的地  $j$  所需的时间为:

$$\Delta T_{i-j} = \sum_{d=1}^m \Delta \bar{T}_{r,d} \quad (10)$$

式中:  $m$  为从地点  $i$  到地点  $j$  最佳路径所包含的过程路段数;  $\Delta \bar{T}_{r,d}$  为 EV 通过路段  $r$  中的  $d$  小段所需时间。

### 2.2.3 停车时间

由于车辆的停车时间影响用户充放电时间, 而停车时长  $t_s$  与其所在区域有关, 因此须对不同区域分别进行考虑<sup>[26-28]</sup>。

W 区的停车时间可用广义极值分布来进行描述, 如式(11)所示。

$$\begin{cases} x = (t_s - 438.445) / 164.506 \\ f_{t_s}(x) = \frac{1}{164.506} \exp\left(-\left(1 - 0.234x\right)^{\frac{1}{0.234}}\right) \times \\ \left(1 - 0.234x\right)^{-1 + \frac{1}{0.234}} \end{cases} \quad (11)$$

H 区的停车时间可用威布尔分布来进行描述, 如式(12)所示。

$$f(t_s) = \frac{1.153}{195.787} \times \left(\frac{t_s}{195.787}\right)^{0.153} \exp\left(-\left(\frac{t_s}{195.787}\right)^{1.153}\right) \quad (12)$$

E 区的停车时间可用广义极值分布来进行描述, 如式(13)所示。

$$\begin{cases} x = \frac{t_s - 68.520}{41.761} \\ f_{t_s}(x) = \frac{1}{41.761} \exp\left(-\left(1 + 0.657x\right)^{\frac{-1}{0.657}}\right) \times \\ \quad \left(1 + 0.657x\right)^{-1-\frac{1}{0.657}} \end{cases} \quad (13)$$

根据式(11)一式(13)可得车辆在不同区域停车时间的概率分布,如图6所示。

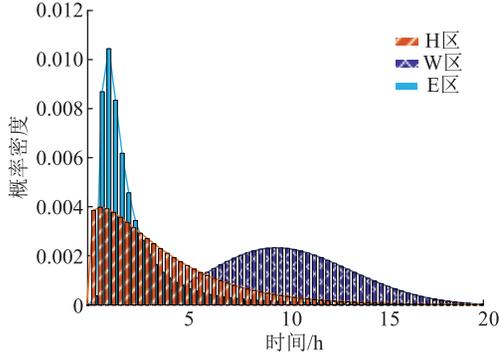


图6 不同区域逗留时间

Fig.6 Parking time in different areas

图6中,在H区的停车时间是指车主在行驶过程中回到H区的停车时间,不包括最后一次到达H区的停车时间。

#### 2.2.4 多行程中下一次出行时间

EV的起始出行时间 $t_1$ 由式(8)随机抽取得到。车辆从当前所在地 $i$ 行驶至下一个目的地 $j$ 的过程中,到达 $i$ 的时间和从 $i$ 地出发到 $j$ 地的出行时间可分别用式(14)、式(15)表示。

$$t_{\text{end},i} = t_1 + \sum_{d=1}^{m-1} \Delta \bar{T}_{r,d} \quad (14)$$

$$t_{\text{start},i \rightarrow j} = t_{\text{end},i} + t_{s,i} \quad (15)$$

式中: $t_{\text{end},i}$ 为EV到达地点 $i$ 的时间; $t_{\text{start},i \rightarrow j}$ 为EV从地点 $i$ 出发前往地点 $j$ 的出行时间; $t_{s,i}$ 为EV在地点 $i$ 的逗留时间。

### 2.3 车辆性能分析

#### 2.3.1 电池初始荷电状态

对于初始荷电状态(state of charge, SOC)  $S_{t_1,i}$ ,采用正态分布  $S_{t_1,i} \sim N(\mu_2, \delta_2^2)$  进行描述<sup>[21]</sup>,如式(16)所示,其概率分布如图7所示。

$$f_{S_{t_1,i}}(x) = \frac{1}{\delta_2 \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - \mu_2)^2}{2\delta_2^2}\right) \quad (16)$$

式中: $\mu_2 = 0.7$ ;  $\delta_2 = 0.1$ 。

#### 2.3.2 任意时刻SOC

当EV行驶至某地时的SOC可由式(17)计算:

$$S_{t_{\text{end}}} = S_{t_{\text{start}}} - \frac{\sum_{d=1}^m W_d l_d}{B} \times 100\% \quad (17)$$

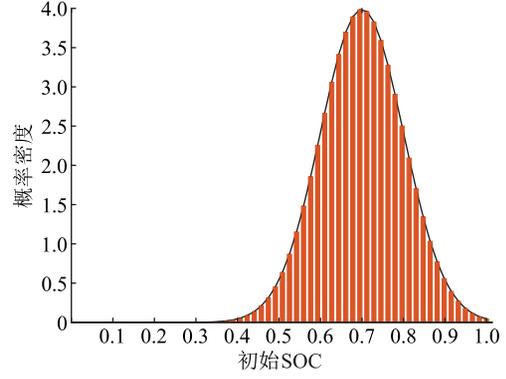


图7 初始SOC分布

Fig.7 Initial SOC distribution

式中: $S_{t_{\text{start}}}$ 为EV离开上一个目的地时的SOC值; $S_{t_{\text{end}}}$ 为EV到达当前场所的SOC值; $W_d$ 为EV行驶时在 $d$ 路段的单位行程耗电量; $l_d$ 为 $d$ 路段的长度; $B$ 为EV电池容量。

当EV行驶至某地时,根据用户需求判断其是否要充电。此时的SOC可由式(18)计算:

$$S_{t+1} = \max\left\{S_t + \frac{\eta_c P_c}{60B}, 1\right\} \quad (18)$$

式中: $S_t$ 、 $S_{t+1}$ 分别为EV此刻和下一时刻的SOC值; $\eta_c$ 为充电桩的效率; $P_c$ 为充电功率。

当EV行驶至某地时,根据用户需求判断其无须充电时的SOC与其刚到达该场所时的SOC保持一致,如式(19)所示。

$$S_{t_{\text{end}}} = S_{t_{\text{start}}} \quad (19)$$

#### 2.3.3 充电需求判断

当EV到达某一目的地时,须根据SOC判断其是否要充电。假设当EV不能满足其下一次可能的行程或电量低于20%时应要充电<sup>[29]</sup>,用户充电决策流程如图8所示。

由图8可知,对于EV是否进行充电的判断中,在考虑了EV当前的电量情况以及后续的行驶需求的基础上,决定是否进行充电,即首先在满足用户基本需求的前提下,参与到调度中。

#### 2.3.4 充电时间计算

当EV行驶至某一场所时,若经判断其应要充电,则其充电时间 $t_c$ 为:

$$t_c = \frac{(S_{t_{\text{end}}} - S_{t_{\text{start}}}) \times 60B}{\eta_c P_c} \quad (20)$$

在实际充电过程中,车辆在某场所逗留时间可能会低于其所需充电时间。为了满足接下来的行驶需求,EV的逗留时间应适当延长,如式(21)所示。

$$t_s = \begin{cases} t_s & t_s > t_c \\ t_c & t_s \leq t_c \end{cases} \quad (21)$$

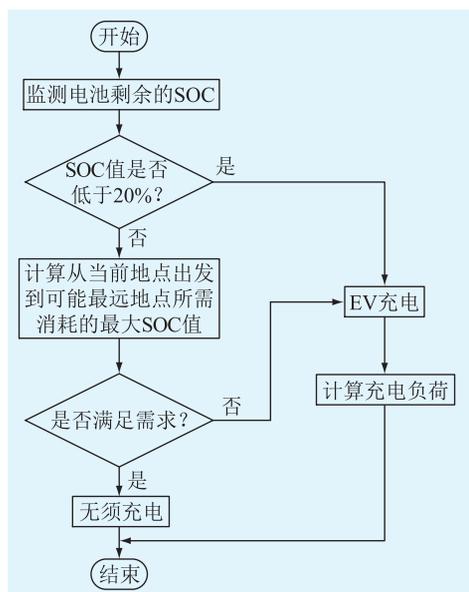


图8 EV充电判断

Fig.8 EV charge judgment

### 2.3.5 充电负荷计算

当车辆到达某个区域时,可利用 2.2 节中的方法获得每辆 EV 的时空行驶分布,并求出该区域的充电负荷。则某区域充电负荷可用式(22)表示。

$$P_{EV,t} = \sum_{k=1}^{n_{EV}} P_{c,k}(t) \zeta_{c,t} \quad (22)$$

式中:  $P_{EV,t}$  为某区域在  $t$  时车辆的充电功率;  $n_{EV}$  为在  $t$  时 EV 的数量;  $P_{c,k}(t)$  为第  $k$  辆 EV 在  $t$  时的充电功率;  $\zeta_{c,t}$  为 EV 在  $t$  时的充电状态,充电时取 1,不充电时取 0。

## 3 基于双向出行链的 EV 调度策略

### 3.1 调度策略

基于双向出行链的 EV 调度策略见图 9。由图 9 可知, EV 在参与调度过程中,要明确当前可参与调度的车辆(根据车辆当前的电量以及需求情况,确定实时能参与到调度中的车辆),并进行调度。

不同区域的调度容量为:

$$P_{D,i}(t) = P_{L,i}(t) - P_{avr,i} \quad (23)$$

式中:  $P_{D,i}(t)$  为在  $t$  时  $i$  处电网的调度容量,该值为正时表示此时电网负荷值高于平均值,应降低 EV 负荷值,当其为负时表示此时电网负荷值低于平均值,应提高 EV 负荷值;  $P_{L,i}(t)$  为在  $t$  时  $i$  处该区域电网常规负荷功率;  $P_{avr,i}$  为调度后  $i$  处电网一天内负荷的平均值,其计算如式(24)所示。

$$P_{avr,i} = \frac{1}{1440} \sum_{t=1}^{1440} P_{L,i}(t) \quad (24)$$

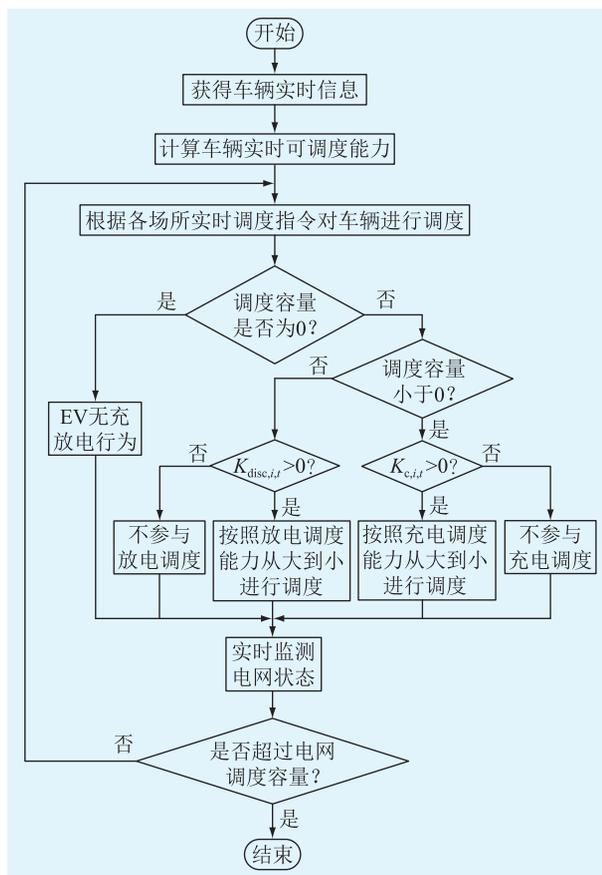


图9 EV充放电调度

Fig.9 EV dispatch for charge and discharge

电网的实时调度容量决定了某时刻调度 EV 的数量和对车辆的调度指令,其在节约电能的同时又能避免在 EV 调度过程中产生新的高峰或低谷,有利于电网的安全、稳定和经济运行。

图 9 中,  $K_{c,i,t}$ 、 $K_{disc,i,t}$  分别为车辆在  $i$  处实时充电和放电的调度灵活度,其表达如式(25)所示。

$$\begin{cases} K_{c,i,t} = t_{s,i} - T_c \\ K_{disc,i,t} = t_{s,i} - T_{disc} \end{cases} \quad (25)$$

式中:  $T_c$ 、 $T_{disc}$  分别为车辆到达某场所后的充、放电可调度时间。

$K_{c,i,t}$  为正时,表示车辆在该区域逗留时间能够满足电网充电调度要求,且该值越大代表充电调度灵活度越大,反之,当该值为负时,表示车辆充电调度灵活性不满足要求;  $K_{disc,i,t}$  为正时,表示车辆在该区域逗留时间能够满足电网放电调度要求,且该值越大代表放电调度灵活度越大,反之,当该值为负时,表示放电调度灵活性不满足要求。

### 3.2 目标函数

负荷均方差能够表征电网的负荷波动,且不需要复杂的潮流计算<sup>[30]</sup>。文中将系统负荷曲线的均方差作为调度目标函数:

$$\min F = \min \left( \frac{1}{1440} \sum_{t=1}^{1440} (P_L(t) + P_{EV}(t) - P_{avr})^2 \right) \quad (26)$$

式中:  $P_{EV}(t)$  为  $t$  时 EV 的负荷功率, 为正时表示该车辆为充电调度状态, 为负时表示车辆为放电状态。

### 3.3 约束条件

(1) 充放电功率约束。

$$P_{EV,\min}(t) \leq P_{EV}(t) \leq P_{EV,\max}(t) \quad (27)$$

式中:  $P_{EV,\max}(t)$  为 EV 在  $t$  时的最大充电功率, 为正值;  $P_{EV,\min}(t)$  为 EV 在  $t$  时的最大放电功率, 为负值。

(2) 电池 SOC 约束。

$$S_{EV,\min}(t) \leq S_{EV}(t) \leq S_{EV,\max}(t) \quad (28)$$

式中:  $S_{EV}(t)$  为 EV 在  $t$  时的电池容量;  $S_{EV,\max}(t)$ 、 $S_{EV,\min}(t)$  分别为 EV 在  $t$  时电池 SOC 的上、下限。

为了更好地符合用户出行规律, 将 EV 电池 SOC 的上限设置为其行驶初始值  $S_{EV}(t_1)$ , 如式 (29) 所示。

$$S_{EV,\max}(t) = S_{EV}(t_1) \quad (29)$$

考虑到用户行驶需求和用户行车安全性, 将电池 SOC 的下限  $S_{EV,\min}(t)$  设置为满足车辆下次行驶需求和 EV 安全行驶要求两者中的较大值, 如式 (30) 所示。

$$S_{EV,\min}(t) = \max\{0.2, S_{lim}\} \quad (30)$$

式中:  $S_{lim}$  为完成下次行驶需求的最小 SOC 值。

(3) EV 充放电不同时约束。

$$s_{EV}(t) = \begin{cases} 1 & \text{充电调度} \\ 0 & \text{停靠} \\ -1 & \text{放电调度} \\ -2 & \text{行驶} \end{cases} \quad (31)$$

式中:  $s_{EV}(t)$  表示  $t$  时为充电调度、停靠、放电调度和行驶中的一种状态。

(4) EV 行驶目的约束。

$$d_{EV,n+1} \neq d_{EV,n} \quad (32)$$

即车辆在此时所在场所类型与下一个目的地类型不同。

(5) EV 空间转移概率约束。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{ij,t} \leq 1 & i \neq j \\ P_{ij,t} = 0 & i = j \end{cases} \quad (33)$$

当 EV 由当前所在地  $i$  转移至下一与当前不同类型的目的地  $j$  时, 其转移概率须大于 0 且小于 1。EV 的转移概率还须满足式 (34)。

$$\sum_{j=1}^n P_{ij,g,t} = 1 \quad (34)$$

(6) EV 放电可调度时间约束。

$$T_{disc} \leq t_s \quad (35)$$

当 EV 处于放电调度状态时, 为满足用户接下来的行驶目的, 其放电时间  $T_{disc}$  应小于等于车辆在该地点的停驻时长  $t_s$ 。

(7) EV 充电可调度时间和逗留时间约束。

$$\begin{cases} t_s = T_c & T_{c,S_{EV,\min}} > t_s \\ t_s \geq T_c & \text{其他} \end{cases} \quad (36)$$

式中:  $T_{c,S_{EV,\min}}$  为 SOC 为其下限值时的充电可调度时间。

## 4 算例仿真

### 4.1 仿真模型

以面积约为 280 m<sup>2</sup> 的某区域为研究对象, 如图 10 所示<sup>[31]</sup>。该区域为含 16 个地点、20 条边的交通网络图。地点 11—地点 16 为 H 区; 地点 2—地点 6 为 W 区; 地点 1、地点 7—地点 10 为 E 区。根据国家发展和改革委员会印发的《EV 充电基础设施发展指南》对城市充电设施的设置建议, H 区 6 个地点和 W 区 5 个地点同时具有快充桩和慢充桩, E 区 5 个地点设置快充桩。

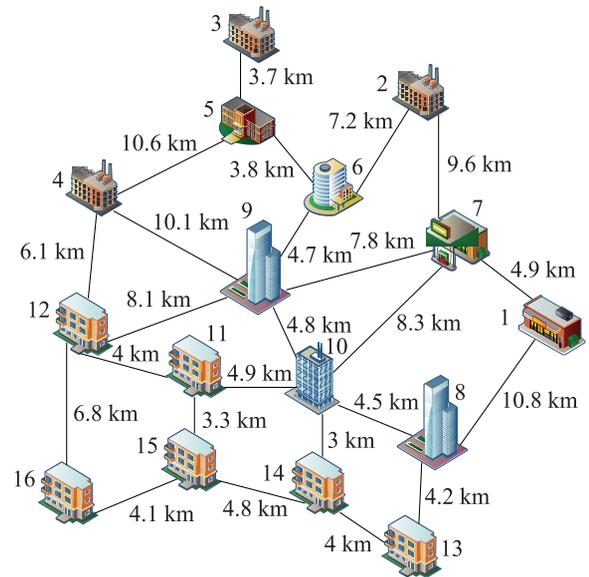


图 10 某区域地图

Fig.10 Map of a certain area

仿真系统参数设置如表 1 所示。文中设置女性车主数和男性车主数均为 1 000 人, 共 2 000 辆车进行仿真。

### 4.2 仿真分析

#### 4.2.1 模型有效性验证

(1) EV 返回住宅时间分析。文中模型模拟的男女车主返回住宅时间与 NHTS2017 统计的数据对比如图 11、图 12 所示。

表 1 EV 参数

Table 1 EV parameters

参数	数值
耗电量 $w/[(\text{kW}\cdot\text{h})\cdot\text{km}^{-1}]$	0.24
电池容量 $E/(\text{kW}\cdot\text{h})$	60
慢充电功率 $P_{c1}/\text{kW}$	7
正常充电功率 $P_{c2}/\text{kW}$	15
快充充电功率 $P_{c3}/\text{kW}$	25
放电功率 $P_{disc}/\text{kW}$	3.5
充电效率 $\eta_1$	0.9
放电效率 $\eta_2$	0.9

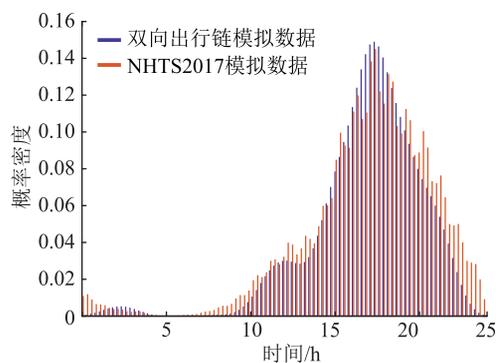


图 11 男性返回住宅时间  
Fig.11 Male home time

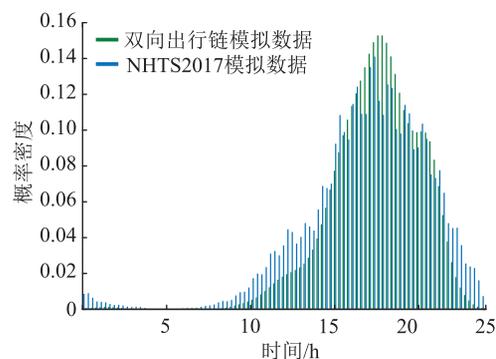


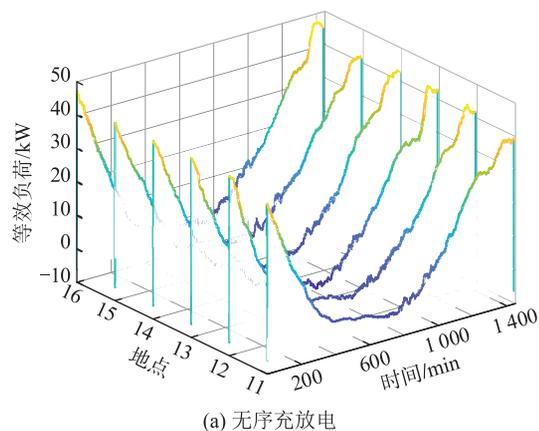
图 12 女性返回住宅时间  
Fig.12 Female home time

由图 11、图 12 可知,所建模型结果与用户实际出行数据的变化趋势基本吻合,与用户实际出行规律基本相符。

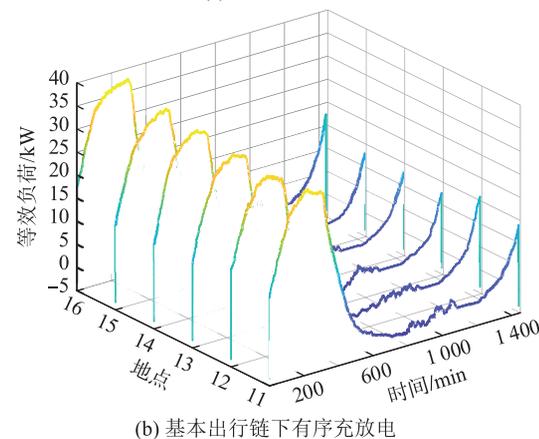
(2) 不同区域不同情况下等效负荷对比。文中采用的充放电方式以保证车主行驶需求为前提,根据 EV 的实时情况判断是否进行充、放电,且假定初始行驶时满足下一行程的需求,以限制电池的频繁充放电,有利于延长电池的使用寿命。不同场所在不同方式下的等效负荷如图 13—图 15 所示。

由图 13—图 15 可知:

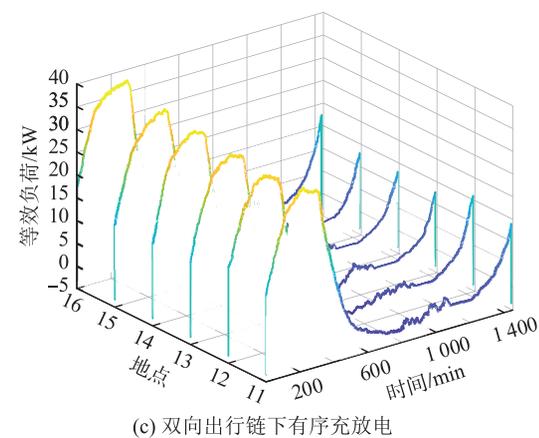
(1) H 区的车辆充电时间集中在晚上,白天基本上既不充电也不放电;W 区的车辆主要在晚间进



(a) 无序充放电



(b) 基本出行链下有序充放电

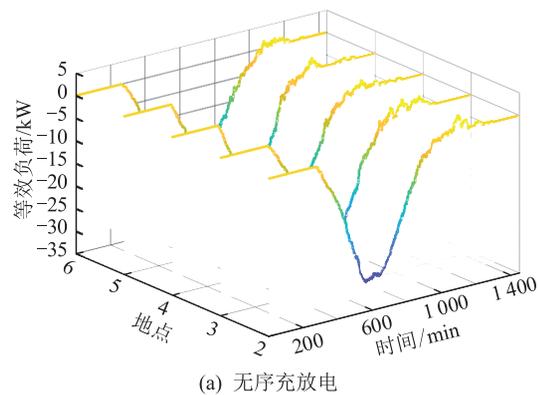


(c) 双向出行链下有序充放电

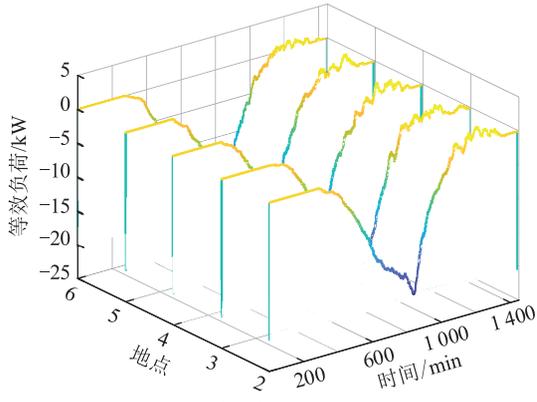
图 13 H 区等效负荷

Fig.13 H area equivalent load

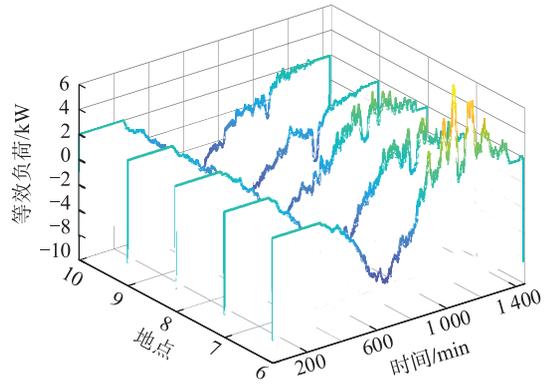
行充电,白天进行放电,在该区域基本上不进行充电;E 区的车辆主要在白天进行放电,在晚上进行充电,



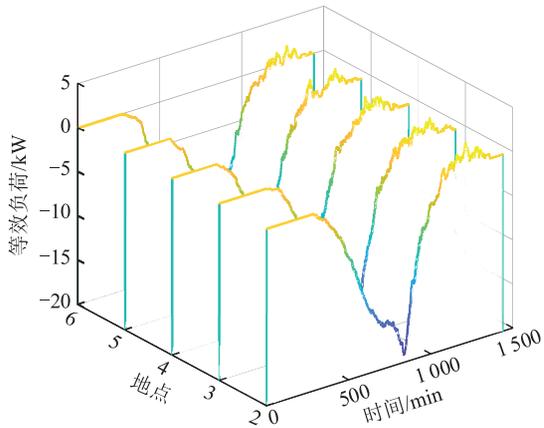
(a) 无序充放电



(b) 基本出行链下有序充放电



(c) 双向出行链下有序充放电



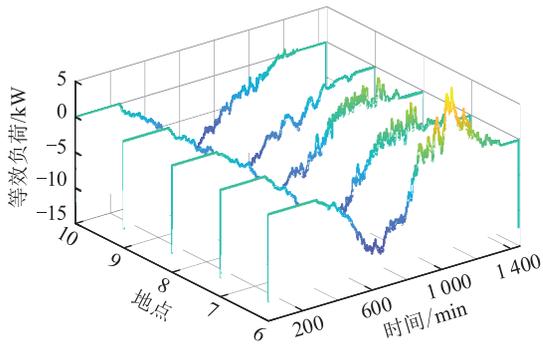
(c) 双向出行链下有序充放电

图 14 W 区等效负荷

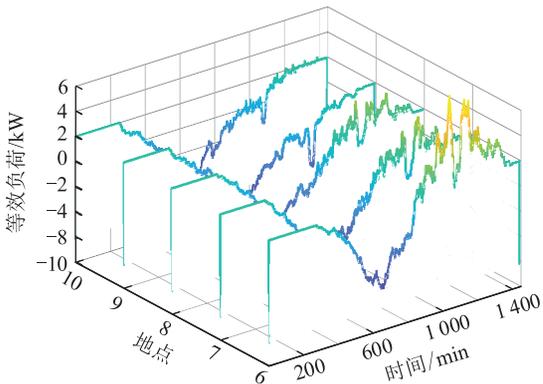
Fig.14 W area equivalent load

与实际生活中车主的用车习惯相符。

(2) 和基本出行链相比,使用双向出行链模型



(a) 无序充放电



(b) 基本出行链下有序充放电

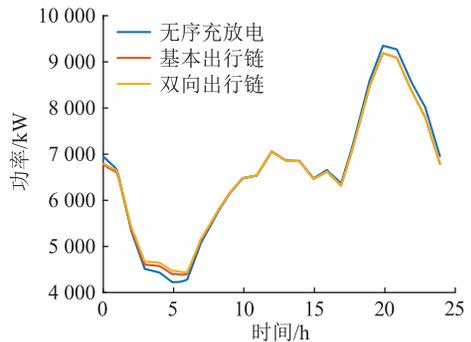
图 15 E 区等效负荷

Fig.15 E area equivalent load

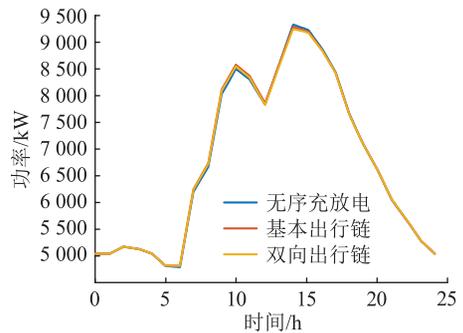
对 EV 进行有序充放电调度时,在非高峰充电、高峰放电方面效果更优,且 2 种模型的效果都优于无序充放电。

#### 4.2.2 平抑系统波动分析

不同区域在 3 种情况下考虑 EV 充放电行为后的负荷功率如图 16 所示。不同区域、不同调度的负荷峰、谷数据如表 2 所示。由图 16 和表 2 可知,在 H 区,双向出行链模型与基本出行链模型相比减少电网峰谷差为 51.23 kW;在 W 区,双向出行链模型与基本出行链模型相比减少电网峰谷差为 37.283 kW;在 E 区,双向出行链模型与基本出行链模型相比减少电网峰谷差为 15.166 kW。由此可知,在平抑系统波动方面,所提出的双向出行链模型与基本出行链模型相比,具有明显优势。



(a) H区负荷功率



(b) W区负荷功率

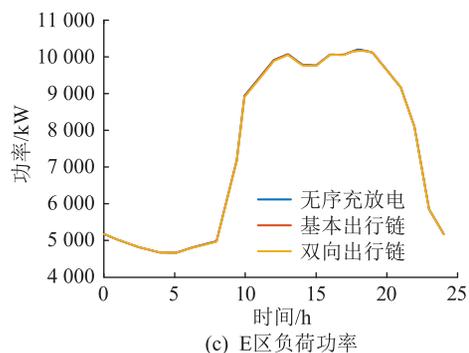


图 16 不同区域负荷功率

Fig.16 Load power in different areas

表 2 电力负荷峰谷数据

Table 2 Peak-valley value of load kW

区域	策略	峰值	谷值	峰谷差
H 区	无序充放电	9 347.857	4 222.913	5 124.944
	基本出行链	9 188.490	4 385.928	4 802.562
	双向出行链	9 187.607	4 436.275	4 751.332
W 区	无序充放电	9 329.736	4 790.030	4 539.706
	基本出行链	9 286.377	4 817.714	4 468.663
	双向出行链	9 249.252	4 817.872	4 431.380
E 区	无序充放电	10 199.270	4 663.792	5 535.478
	基本出行链	10 173.220	4 662.417	5 510.803
	双向出行链	10 158.420	4 662.783	5 495.637

## 5 结论

针对现有 EV 调度过程中忽略 EV 双向流动和未考虑车主由于性别差异造成出行目的不同的问题,建立了考虑车主性别、车主实时出行目的地和车辆双向行驶的双向出行链模型。以该模型为基础,建立了以网内波动最小为目标的 EV 优化调度函数。通过对比不同模型下调度策略的算例仿真,可得到以下结论:

(1) 建立的双向出行链模型无须事先设定出行链的类型和长度,而是根据车主当前所处位置对居民的出行链进行随机模拟的,考虑了用户差异性,更加符合实际的居民出行规律。

(2) 通过对比不同模型、不同区域的等效负荷和电网功率可知,EV 作为一种移动储能装置,采用的充、放电模型和调度策略可以有效平抑电网波动。

文中研究未考虑充电设施数量、位置以及车主职业等因素对 EV 调度的影响、对于时间因素之间的相关性问题的用户参与调度的实际收益等问题,后续均有待进一步研究。

### 参考文献:

[1] 余静. 电动汽车与智能电网及分布式能源融合关键技术研

究[J]. 电力设备管理,2020,41(2):114-115.

YU Jing. Research on key technologies for the integration of electric vehicles and smart grid and distributed energy[J]. Electric Power Equipment Management,2020,41(2):114-115.

[2] 党杰,汤奕,宁佳,等. 基于用户意愿和出行规律的电动汽车充电负荷分配策略[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(16):8-15.

DANG Jie,TANG Yi,NING Jia,et al. A strategy for distribution of electric vehicles charging load based on user intention and trip rule[J]. Power System Protection and Control,2015,43(16):8-15.

[3] 李瑶虹,陈良亮,刘卫东,等. 基于用户出行链和调控意愿的城市级私家电动汽车调控能力评估[J]. 电力建设,2021,42(5):100-112.

LI Yaohong,CHEN Liangliang,LIU Weidong,et al. Regulation ability estimation of private EVs at city level considering users trip chain and regulation willingness[J]. Electric Power Construction,2021,42(5):100-112.

[4] 葛晓琳,史亮,刘亚,等. 考虑需求响应不确定性的电动汽车负荷 Sigmoid 云模型预测[J]. 中国电机工程学报,2020,40(21):6913-6925.

GE Xiaolin,SHI Liang,LIU Ya,et al. Load forecasting of electric vehicles based on sigmoid cloud model considering the uncertainty of demand response[J]. Proceedings of the CSEE,2020,40(21):6913-6925.

[5] ANASTASIADIS A G,KONSTANTINOPOULOS S,KONDYLIS G P,et al. Electric vehicle charging in stochastic smart microgrid operation with fuel cell and RES units[J]. International Journal of Hydrogen Energy,2017,42(12):8242-8254.

[6] 程杉,王贤宁,冯毅焜. 电动汽车充电站有序充电调度的分散式优化[J]. 电力系统自动化,2018,42(1):39-46.

CHENG Shan,WANG Xianning,FENG Yichen. Decentralized optimization of ordered charging scheduling in electric vehicle charging station[J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(1):39-46.

[7] 张宁,刘晓波,黄少华,等. 考虑电网-用户多目标的 V2G 模式研究[J]. 电力科学与工程,2020,36(4):32-37.

ZHANG Ning,LIU Xiaobo,HUANG Shaohua,et al. Research on V2G model considering grid-user multi-objective[J]. Electric Power Science and Engineering,2020,36(4):32-37.

[8] 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 Lidán,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.

[9] 陈丽丹,张尧,Antonio Figueiredo. 融合多源信息的电动汽车充电负荷预测及其对配电网的影响[J]. 电力自动化设备,2018,38(12):1-10.

CHEN Lidán,ZHANG Yao,FIGUEIREDO A. Charging load forecasting of electric vehicles based on multi-source information

- fusion and its influence on distribution network [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2018, 38(12): 1-10.
- [10] 赵书强,周靖仁,李志伟,等. 基于出行链理论的电动汽车充电需求分析方法[J]. *电力自动化设备*, 2017, 37(8): 105-112.
- ZHAO Shuqiang, ZHOU Jingren, LI Zhiwei, et al. EV charging demand analysis based on trip chain theory [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2017, 37(8): 105-112.
- [11] 罗江鹏,张玮,王国林,等. 基于出行链数据的电动汽车充电需求预测模型[J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2020, 34(6): 1-8.
- LUO Jiangpeng, ZHANG Wei, WANG Guolin, et al. An electric vehicle charging demand forecast model based on trip chain data [J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2020, 34(6): 1-8.
- [12] 李含玉,杜兆斌,陈丽丹,等. 基于出行模拟的电动汽车充电负荷预测模型及 V2G 评估[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(21): 88-96.
- LI Hanyu, DU Zhaobin, CHEN Lidan, et al. Trip simulation based charging load forecasting model and vehicle-to-grid evaluation of electric vehicles [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(21): 88-96.
- [13] 侯慧,薛梦雅,陈国炎,等. 计及电动汽车充放电的微电网多目标分级经济调度[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(17): 55-62.
- HOU Hui, XUE Mengya, CHEN Guoyan, et al. Multi-objective hierarchical economic dispatch for microgrid considering charging and discharging of electric vehicles [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(17): 55-62.
- [14] 黄一诺,郭创新,王力成,等. 考虑用户满意度的电动汽车分群调度策略[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(17): 183-191.
- HUANG Yinuo, GUO Chuangxin, WANG Licheng, et al. A cluster-based dispatch strategy for electric vehicles considering user satisfaction [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(17): 183-191.
- [15] 潘振宇,张孝顺,余涛,等. 大规模电动汽车集群分层实时优化调度[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(16): 96-104.
- PAN Zhenning, ZHANG Xiaoshun, YU Tao, et al. Hierarchical real-time optimized dispatching for large-scale clusters of electric vehicles [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(16): 96-104.
- [16] 杨锐. 基于住宅区的电动汽车有序充放电策略研究[J]. *黑龙江电力*, 2019, (41)3: 189-193, 200.
- YANG Rui. Research on ordered charging and discharging strategy for electric vehicles based on residential areas [J]. *Heilongjiang Electric Power*, 2019, 41(3): 189-193, 200.
- [17] 赵昕,关宏志,刘诗序. 基于出行链的有车家庭假日出行方式组合研究[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2011, 35(6): 1139-1142.
- ZHAO Xin, GUAN Hongzhi, LIU Shixu. Study on combined mode choice behavior in holiday based on trip-chain [J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2011, 35(6): 1139-1142.
- [18] U S Department of Transportation. Federal highway administration, national household travel survey (NHTS) [EB/OL]. (2017-07-02) [2022-02-08]. <http://nhts.orl.gov/download.shtml>. 2017.
- [19] GRAHN P, MUNKHAMMAR J, WIDÉN J, et al. PHEV home charging model based on residential activity patterns [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(3): 2507-2515.
- [20] 刘俊勇,向月,姚昊天,等. 三网融合下充电服务网规划与运营探讨[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(12): 1-12.
- LIU Junyong, XIANG Yue, YAO Haotian, et al. Discussion on planning and operation of charging service network integrated with power and transportation networks [J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(12): 1-12.
- [21] 宋雨浓,林舜江,唐智强,等. 基于动态车流的电动汽车充电负荷时空分布概率建模[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(23): 47-56.
- SONG Yunong, LIN Shunjiang, TANG Zhiqiang, et al. Spatial-temporal distribution probabilistic modeling of electric vehicle charging load based on dynamic traffic flow [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(23): 47-56.
- [22] 陈艺灵,吕志鹏,周珊. 基于云边缘协同的电动汽车多目标优化调度[J]. *供用电*, 2022, 39(4): 17-24.
- CHEN Yiling, LYU Zhipeng, ZHOU Shan. Multi-objective optimal scheduling of electric vehicles based on cloud edge end cooperation [J]. *Distribution & Utilization*, 2022, 39(4): 17-24.
- [23] 方华亮,廖家齐,徐彦,等. 基于风险评估的电动汽车直流充电站运维策略[J]. *电力科学与技术学报*, 2021, 36(1): 96-105.
- FANG Hualiang, LIAO Jiaqi, XU Yan, et al. Maintenance strategy research of DC charging stations for electric vehicle based on risk assessment [J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2021, 36(1): 96-105.
- [24] 孔顺飞,胡志坚,谢仕炜,等. 考虑分布式储能与电动汽车充电网络的配电网多目标规划[J]. *电力科学与技术学报*, 2021, 36(1): 106-116.
- KONG Shunfei, HU Zhijian, XIE Shiwei, et al. Multi-objective planning of distribution network considering distributed energy storage and electric vehicle charging network [J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2021, 36(1): 106-116.
- [25] 袁小溪,潘鸣宇,段大鹏,等. 基于网格划分的电动汽车充电负荷预测方法[J]. *电力科学与技术学报*, 2021, 36(3): 19-26.
- YUAN Xiaoxi, PAN Mingyu, DUAN Dapeng, et al. Prediction method of electric vehicle charging load based on grid division [J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2021, 36(3): 19-26.
- [26] 朱宗耀. 计及电动汽车充电负荷的微电网能量优化调度研究[D]. 西安:西安理工大学, 2018.
- ZHU Zongyao. Research on energy optimization dispatch of microgrid considering charging load of electric vehicles [D].

- Xi'an; Xi'an University of Technology, 2018.
- [27] 贺瑜环,杨秀媛,陈麒宇,等. 电动汽车智能充放电控制与应用综述[J]. 发电技术,2021,42(2):180-192.  
HE Yuhuan, YANG Xiuyuan, CHEN Qiyu, et al. Review of intelligent charging and discharging control and application of electric vehicles [J]. Power Generation Technology, 2021, 42(2):180-192.
- [28] 陈小波,杨秀媛. 泛在电力物联网中考虑风电消纳的电动汽车充放电控制策略研究[J]. 发电技术,2021,42(5):561-567.  
CHEN Xiaobo, YANG Xiuyuan. Research on charging-discharging control strategy of electric vehicles considering wind power consumption in ubiquitous power Internet of Things [J]. Power Generation Technology, 2021, 42(5):561-567.
- [29] 赵书强,周靖仁,李志伟,等. 基于出行链理论的电动汽车充电需求分析方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(8):105-112.  
ZHAO Shuqiang, ZHOU Jingren, LI Zhiwei, et al. EV charging demand analysis based on trip chain theory [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8):105-112.
- [30] 魏大钧,张承慧,孙波,等. 基于分时电价的电动汽车充放电多目标优化调度[J]. 电网技术,2014,38(11):2972-2977.  
WEI Dajun, ZHANG Chenghui, SUN Bo, et al. A time-of-use price based multi-objective optimal dispatching for charging and discharging of electric vehicles [J]. Power System Technology, 2014, 38(11):2972-2977.
- [31] 张谦,王众,谭维玉,等. 基于MDP随机路径模拟的电动汽车充电负荷时空分布预测[J]. 电力系统自动化,2018,42(20):59-66.  
ZHANG Qian, WANG Zhong, TAN Weiyu, et al. Spatial-temporal distribution prediction of charging load for electric vehicle based on MDP random path simulation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(20):59-66.

作者简介:



王宜立

王宜立(1991),男,硕士,工程师,从事电力系统运行与控制相关工作(E-mail:101366-764@qq.com);

张蓉馨(1994),女,学士,助理工程师,从事电力系统运行与控制相关工作;

杨再鹤(1990),男,硕士,工程师,从事电力系统运行与控制相关工作。

### Stabilizing power fluctuation strategy based on two-way travel chain of electric vehicle

WANG Yili<sup>1</sup>, ZHANG Rongxin<sup>2</sup>, YANG Zaihe<sup>1</sup>, SHAN Zuzhi<sup>1</sup>, XU Xiaoliang<sup>3</sup>, LYU Guangqiang<sup>4</sup>

(1. Yunnan Power Grid Dispatching and Control Center, Kunming 650011, China;

2. Wenshan Power Supply Bureau, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Wenshan 663099, China;

3. NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China;

4. School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** Aiming at the power fluctuation problem for the randomness of the time-space transfer of electric vehicles (EV), taking into account the gender difference of car owners, different real-time travel purpose and two-way travel of car owners, the charge-discharge dispatch strategy based on the two-way travel chain for the travel randomness of EV is proposed. Firstly, the two-way travel chain of EV is established by considering the actual travel process of car owners. Secondly, the real-time travel probability model is given by considering the gender differences of the male and female owners travel. Then, the dispatch model is set up by reducing the power fluctuation as the objective function according to the real-time travel demand of the owner and the real-time state of charge (SOC) of EV. Finally, the charge and discharge of EV are dispatched according to the established model, and the simulation is given by analyzing the cars in a area of 280 square meters. The simulation results show that the two-way travel model is closer to the actual travel law of owners, and the dispatch strategy based on the dispatched model of the two-way travel chain can better restrain the power fluctuation.

**Keywords:** electric vehicle (EV); two-way travel chain; power fluctuation; vehicle-to-grid (V2G); charge-discharge dispatch; state of charge (SOC)

(编辑 钱悦 江林)