

考虑活动-出行需求特性的大规模电动汽车并网 影响力分析

孙志颖¹, 李青², 张凯¹

(1. 南京信息工程大学自动化学院, 南京 210044; 2. 南京信息工程大学管理工程学院, 南京 210044)

摘要: 分析电动汽车(electric vehicle, EV)用户充电需求的复杂性及其作用规律是提高大规模EV并网情境下配电网络鲁棒性与韧性的基础工作, 但现有研究较少关注EV用户充电需求的派生性。首先从充电需求产生的本源出发, 基于EV用户活动-出行时空轨迹建立交通-电力耦合网络模型以揭示EV在交通-电力耦合系统的媒介机制。然后从交通侧考虑EV用户活动及出行行为特性建立活动-出行链模型, 并基于Logit模型预测EV充电需求。从电网侧以电压偏移严重程度、线路极限功率传输裕度以及电力系统线路损耗等指标构建了EV并网影响力评估体系。最后以交通-电力耦合度为调节变量分析了不同情境下不同区域EV充电负荷对电网的影响力, 为引导EV用户在时空间维度有序充电的调度管理提供理论支撑。

关键词: 交通-电力耦合网络; 电动汽车; 活动-出行需求; 充电需求; 影响力评估

Influences Analysis of Large-Scale Electric Vehicles Interconnected with Power System Regarding Activity-Travel Demand Characteristics

SUN Zhiying¹, LI Qing², ZHANG Kai¹

(1. School of Automation, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. School of Management Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: The analysis of the complexity of electric vehicle (EV) users' charging demand and action law is the fundamental work to improve the robustness and resilience of distribution network in the context of large-scale EV integration. Existing researches made little efforts on the description of the derivative nature of EV charging demand. Firstly, starting from the origin of charging demand, a transportation power coupling network model is established based on the spatiotemporal trajectory of EV user activity travel to reveal the medium mechanism of EV in the transportation power coupling system. Secondly, from the perspective of transportation, an activity travel chain model is established considering the characteristics of EV user activities and travel behavior, and EV charging demand is predicted based on the Logit model. A logit-based model is applied to predict EV charging demand. Then, from the perspective of the power grid, an evaluation system for the impact of EV grid connection is constructed based on indicators such as voltage offset severity, maximum power transmission margin of the line, and power system line losses. Finally, based on simulation, the influence of EV charging loads in different regions on the power grid under different scenarios is analyzed with the coupling degree of transportation and electricity as the regulating variable, providing theoretical support for guiding EV users to schedule and manage orderly charging in the temporal and spatial dimensions.

Key words: traffic-power coupled network; electric vehicle; activity-travel demand; charging demand; impact assessment

0 引言

电动汽车(electric vehicle, EV)作为交通系统与电力系统的媒介,在实现“碳达峰,碳中和”目标的能源路径上起着至关重要的作用。自2016年以来中国新能源汽车连续8年稳步增长,截至2022年中国新能源汽车产量达到705.8万辆。2022年EV渗透率已达25.6%,由近年来EV增长趋势估计2023年中国新能源汽车渗透率将高达30%^[1-3]。大规模EV入网必然引发配电网的剧烈波动,准确预测EV用户的充电需求进而评估大规模EV入网的影响力将有助于相关部门制定维护电网稳定性的方案。

近年来,针对EV入网的影响力评估问题已得到学者们的广泛关注。文献[4]从电网运行风险的角度研究了“车-路-网”模式下EV充电负荷对配电网潮流分布的影响。文献[5]建立了电动汽车入网后电网调度模型。文献[6]等针对恶劣充电场景分析了临界状态下的电压分布特性,同时量化了城市配电网对EV的接收上限。文献[7]建立了节点、线路重要度以及综合评估指标对大规模EV入网的影响进行分析。文献[8-9]从电网运行的经济视角分别从交通网、电网和EV用户的收益、电网损耗、分布式发电弃电、负荷峰谷差惩罚因子的加权成本为指标对EV参与的主动配电网进行调度。文献[10]从充电网络供需匹配、负荷需求覆盖密度以及充电站服务质量的视角评估EV入网对城市区域电力系统的影响。但是,上述研究较少刻画充电需求的产生和时空演化的规律,未能揭示EV充电需求产生的根本原因。

考虑到EV充电需求的特征,文献[11-14]通过模拟EV用户的交通行为获得EV充电需求的时空分布。文献[15]对EV空间转移率进行曲线拟合,结合NHTS2009数据构建了EV出行链实现了对充电负荷时空分布的预测,该方法具有较大的随机性和预测误差。考虑到出行需求的电量消耗和用户主观意愿,文献[16]提出了基于EV全轨迹的充电负荷预测模型,分析了不同EV渗透率下电网节点失负荷量。文献[17]通过清洗和挖掘了EV的行车轨迹大数据特征,基于动态能耗理论提出了EV充电负荷预测模型。文献[18]计及路网交通流量和环境温度分析环境与EV能耗之间的关系,提出了考虑EV

用户出行意愿的出行链模型,准确预测充电负荷的时间分布。文献[19]考虑到用户的出行行为特性受天气、日期和汽车状态等因素影响,在刻画用户交通行为的基础上构建了EV充电负荷预测模型。但是,上述充电需求预测方法较少能从源头揭示充电需求时空演化的根本原因。考虑到充电需求与出行者活动-出行之间的密切关联性,文献[20]基于动态活动-出行流量分配模型对多模式交通系统中EV充电需求的时空演化规律进行了研究。但是,该工作未对EV入网的影响进行分析。

本文基于活动分析法探究EV充电需求的时空分布规律提出了考虑活动-出行需求特性的EV入网影响分析模型,在以下几个方面对现有文献进行了补充:1)综合考虑了EV用户活动参与需求引导下的出行与充电决策机制。2)建立了包含EV用户活动与出行相关属性的效用函数,并基于随机效用最大化理论与充电决策规则建立了EV充电需求时空分布预测模型。3)考虑到交通-电力耦合网络拓扑结构对EV入网影响力的影响,在算例分析部分对不同耦合密度、耦合形式下的电网安全性进行了评估。

1 基于EV的交通-电力耦合关系分析

1.1 交通-电力耦合网络模型

为了描述以EV为媒介的交通-电力耦合网络之间的关联性,图1给出了基于EV用户全轨迹时空分的交通-电力耦合模型示意图。

第一层为某EV用户一天的活动-出行的全轨迹时空分布图,横轴为空间,纵轴为时间。该用户在 t_{start} 时刻从居民区(H)出发,EV初始荷电状态为 $S_{\text{H}}^{\text{SOC}}$,该用户驾驶EV在 t_{w} 时刻到达工作区(W),EV的荷电状态变为 $S_{\text{W}}^{\text{SOC}}$,完成工作后该用户驾驶EV到达商业区(C),EV的荷电状态变为 $S_{\text{C}}^{\text{SOC}}$,选择在该地为EV充电,活动结束后,该用户驾驶EV回家,EV的荷电状态变为 $S_{\text{H}}^{\text{SOC}}$ 。第二层为交通网,节点为活动地点,该用户在该节点处停车、取车、工作和娱乐;节点与节点之间的边为出行路段。第三层为配电网,通过充电站与交通网实现耦合。

令交通网络为 $N_{\text{ATL}} = (F, L, A, S)$, F 为交通网活动节点集合, L 为交通网出行路段集合, A 为活动路段集合, S 为路径集合。令配电网为 $E =$

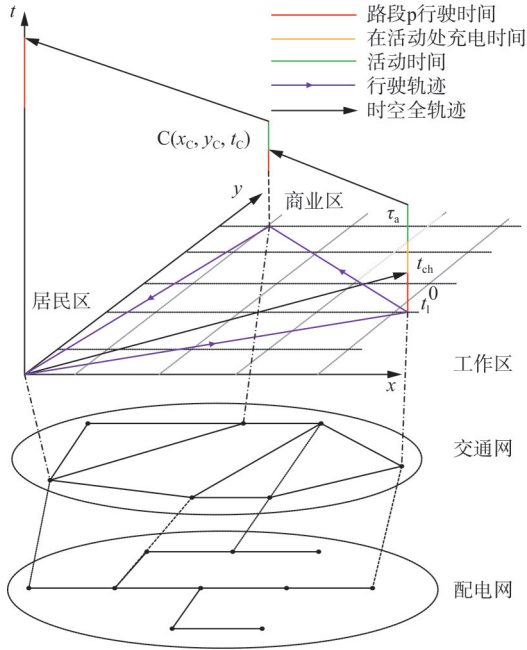


图1 基于全轨迹空间的交通-电力耦合网络示意图

Fig. 1 Sketch diagram of a coupled traffic-power network based on a whole trajectory space

(I, B, Z, R) , I 为配电网节点集合, B 为配电网连线集合, Z 和 R 分别为线路阻抗和电阻集合。

1.2 基于耦合网络的EV荷电状态分析

为刻画出行者的交通行为过程, 现有研究中主要基于出行^[21-22]、巡回^[23-24]、活动^[25-26]3种视角。其中, 基于出行的模型仅围绕出行相关的属性, 如出发时间、出行方式、出行路径等属性; 基于巡回的模型考虑到出行与出行之间的关联, 包含了出行者从起点出发经过多次出行回到起点的过程; 基于活动的模型则综合考虑活动与出行相关的属性, 包括: 出发时间、出行方式、出行路径、活动安排、活动性质、活动开始时间、活动持续时间等。本文基于活动的视角对EV用户的活动-出行过程进行分析, 该过程是EV电量变化与充电决策产生的基础, 图2给出了两者之间的关联性。

EV用户在 t_{start} 时刻从家出发前往工作地, 完成工作后前往商业区, 根据当前车辆电量选择是否进行充电, 且充电时长不大于活动时长, 休闲娱乐活动完成后回家。活动-出行链包含以下信息。

1) 时间维度, 描述EV用户活动-出行时间的变化。该条链的起讫时刻分别为 t_{start} 、 t_{end} , 第一条出行路段 l_1 的正向出行时长为 $t_{l_1}^0$ 、反向出行时长为 $t_{l_1}^0$, 第二条出行路段 l_2 的正向出行时长为 $t_{l_2}^0$, 第一个活

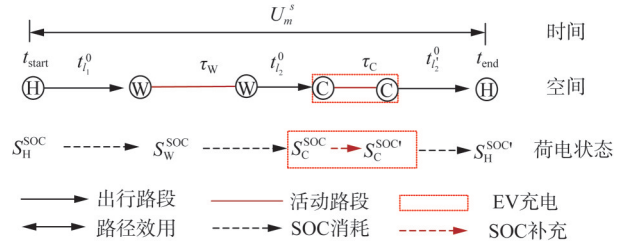


图2 EV用户活动-出行链与EV荷电状态关联示意图

Fig. 2 Sketch diagram of the correlation between EV users' activity-travel chain and the state of charge

动行为的时长为 τ_w , 第二个活动行为的时长为 τ_c 。

2) 空间维度, EV用户从H出发, 行驶过 l_1 到达W, 经过 l_2 到达C产生充电需求, 最后返回H。

3) 荷电状态, EV的荷电状态 S_C^{SOC} 随时间、空间的变化而发生相应的变化, 出行过程中荷电状态降低, 产生充电需求后荷电状态得到补充, 如上图, EV到达C处时荷电状态为 S_C^{SOC} , 完成充电行为离开C的荷电状态为 $S_C^{\text{SOC}'}$ 。

4) 效用值 U_m^s , 描述 m 类EV用户对活动-出行链 S 的感知价值, 并基于Logit选择活动-出行链, 得到该活动-出行链上的总出行人数, 进而获得活动-出行链上相应位置的充电需求。

2 基于活动的EV入网影响力评估模型

2.1 交通侧: 基于活动-出行链的充电预测模型

使用广义效用函数表示用户活动-出行成本与体验的关联性, EV用户活动-出行效用由用户出行路段与活动路段效用组成。根据随机效用理论, 将用户按照活动-出行需求的差异性划分为 M 个类别, 其中 m 为第 m 类用户, 即 $m \in M$ 。 m 类EV用户选择路径 $s(s \in S)$ 的效用为 $\bar{U}_m^s$ 由常规项 $\bar{V}_m^s$ 和随机误差项 ε_m^s 组成表示为:

$$\bar{U}_m^s = \bar{V}_m^s + \varepsilon_m^s \quad (1)$$

随机项用来描述无法观察到的影响路径效用的因素, 假设其服从二重指数分布(Gumbel distribution)。令活动-出行链中通过路段 l 从出发地到活动目的地的出行路段效用为 $\bar{V}_m^l(t)$, a 为用户进行的活动种类, 活动路段效用为 $\bar{V}_m^a(t, \tau_a)$, 总路径效用 $\bar{U}_m^s(t_{\text{start}})$, 由该路径上包含的出行与活动效用决定^[27-28]。用户的出行路段效用考虑路段行驶时间成本以及EV的行驶成本:

$$\bar{V}_m^l(t) = -t_l^0(\theta_1 + \theta_2\omega) \quad (2)$$

式中: t_l^0 为路段 l 的自由流; ω 为 EV 单位时间的耗电成本; θ_1 、 θ_2 分别为 EV 行驶时间和耗电的成本系数。EV 用户的活动效用是与活动时长 τ_a 以及活动开始时刻 t 相关的函数^[29], 如式(3)所示。

$$\bar{V}_m^a(t, \tau_a) = f_a(t) \log(1 + \beta\tau_a) \quad (3)$$

式中: $f_a(t)$ 为以二次函数形式设置的时间依赖函数, 其中获得两个与时间相关的峰值; $\log$ 函数描述活动持续时长与活动效用的关系, 活动持续时长越短则效用增长越快; β 为常数项, 此处取-1。表示不同活动时刻和活动时长下吸引力水平。定义 $\delta_{mt_start}^{sl}(t)$ 和 $\delta_{mt_start}^{sa}(t)$ 为 0-1 矩阵。矩阵中对应路段 l 的取值为 1 时表示路径 s 中包含该路段, 取值为 0 时则表示路径 s 不包含该路段。矩阵中对应活动路段 a 同上。EV 用户选择路径 s 从 t_{start} 时刻出发在 t 时刻到达路段 l 的路径状态转移函数如式(4)所示。

$$\bar{U}_m^s(t_{start}) = \sum_{l \in L} \sum_t \delta_{mt_start}^{sl}(t) \bar{V}_{mt_start}^l(t) + \sum_{a \in A} \sum_t \delta_{mt_start}^{sa}(t) \bar{V}_{mt_start}^a(t) + \varepsilon_m^s \quad (4)$$

根据随机效用最大化理论, 当且仅当 $\bar{U}_m^s > \bar{U}_m^{s'} (s \in S, \forall s' \neq s)$ 时该类出行者选择路径 s , 则 m 类出行者选择路径 s 的概率为:

$$P_m^s(\bar{U}_m^s \geq \bar{U}_m^{s'}) = \frac{\exp(\bar{U}_m^s)}{\sum_{s' \in S} \exp(\bar{U}_m^{s'})} \quad (5)$$

EV 的行驶过程持续耗电, 假设 EV 耗电量是稳定的, EV 用户到达当前活动地点 a 不充电继续完成活动-出行链的下一段出行, 到达下一活动地点 a' 处的预估荷电状态用 $O'_{soc}(t_{a'})$ 表示。

$$O'_{soc}(t_{a'}) = \left[O_{soc}(t_{a'}) - \frac{\eta t_l^0}{C} \right] \times 100\% \quad (6)$$

式中: C 为 EV 电池容量; η 为 EV 单位时间耗电量。

$$\gamma_m^a(t) = \begin{cases} 1, & O'_{soc}(t_{a'}) \leq O_{soc_min} \\ 0, & O'_{soc}(t_{a'}) > O_{soc_min} \end{cases} \quad (7)$$

$$t_a^{ch} = \left[O_{soc_max} - O'_{soc}(t_{a'}) \right] \frac{C}{P_{ev}} \quad (8)$$

式中: P_{ev} 为 EV 充电功率; EV 到达每个活动节点 a 处预估此刻荷电状态是否支持下一次出行的充电决策记为 $\gamma_m^a(t)$, $\gamma_m^a(t)$ 为 1 时表示充电, 为 0 时表示不充电; t_a^{ch} 为活动节点 a 的充电时长。

2.2 电力侧: EV 充电负荷对配电网的影响力评估模型

2.2.1 节点电压越限风险指标

为描述配电系统中外在因素引发电力系统母线电压过高的危害及其造成的故障引入风险理论中节点电压越限风险指标。考虑配电网故障 $N-l+1$ 种情况, 在某条线路断路时为保证供电正常需闭合联络开关, 但这种情况易造成电压波动, 再次引发故障。参考 10 kV 电力系统线路正常运行中电压偏移量不超过 7%, 节点过电压指标如式(9)所示^[30]。

$$U_{\pm} = \begin{cases} \frac{(U_i - U_{max})}{0.07}, & U_i > U_{max} \\ 0, & U_{min} \leq U_i \leq U_{max} \\ \frac{(U_{min} - U_i)}{0.07}, & U_i < U_{min} \end{cases} \quad (9)$$

式中 U_i 为配电网节点 i 电压的标么值。当电力系统的电压在允许偏移量范围内时的电压损失严重度在允许偏移量之外, 电力系统随着偏移量增大风险系数增大。通过电压标么值超越上(下)限的程度反映电网运行风险程度。

2.2.2 支路传输功率极限的相对功率裕度

计算基于戴维南等值和支路传输功率极限的相对功率裕度^[31], 该指标为反映当前电网电压越限状态距离电压崩溃临界点的距离, 比较出分析出系统在当前负载状态下电压最薄弱的节点。该值越小表明该评估节点稳定性越低, 该点越薄弱。对于一个 N 节点的电力系统, 选取第 i 个节点作为评估对象时, 单独增大电网中某负荷节点功率对整个电力系统的影响忽略不计, 因此在保持网络拓扑参数和其余节点注入功率不变的情况下, 按照恒定功率因数将待评估节点负荷功率由 $P_i + jQ_i$ 增大至 $\lambda(P_i + jQ_i)$, 其中 $\lambda > 1$ 。通过对增大功率前后的电力系统分别进行潮流计算得到该节点当前电压向量 $\dot{V}_i'$ (假定戴维南等值参数前后保持不变), 对负荷增大后的系统同样获得结果, 两次计算联立求得戴维南等值电势和等值阻抗。

$$\dot{V}_{th} = \frac{(\dot{V}_i')^2 - \lambda \dot{V}_i'^2}{(\dot{V}_i')^* - \lambda \dot{V}_i'^*} \quad (10)$$

$$Z_{th} = \frac{(\dot{V}_i' - \dot{V}_{th})(\dot{V}_i \dot{V}_i')^*}{(P_i - jQ_i)((\dot{V}_i')^* - \lambda \dot{V}_i'^*)} \quad (11)$$

式中: P_i 、 Q_i 分别为节点 i 的有功、无功功率; $\dot{V}_i$ 、

$\dot{V}_i'$ 分别为系统功率增大前后节点 i 的电压向量；上标 * 表示向量的共轭值。

当系统功率增大到支路所能承受的传输功率极限时负荷节点功率可以设为 $\left(1 + j \frac{Q_{i,0}}{P_{i,0}}\right) P_{i,\max}$ ，其中 $P_{i,0}$ 、 $Q_{i,0}$ 分别为节点 i 初始注入有功功率和无功功率， $P_{i,\max}$ 为节点 i 的最大注入功率， $Y_{ij} \angle \theta_{ij}$ 为导纳矩阵对应行列元素的极坐标形式。根据电力系统的功率平衡方程、潮流方程和静态电压稳定判别式可得功率传输极限处的两个解为 $P_{i,\max \pm}$ ，在求得 $P_{i,\max \pm}$ 值后待评估的负荷节点处功率稳定程度 ψ_i 由式(12)表示。

$$\psi_i = \frac{P_{i,\max \pm} - P_i}{P_{i,\max \pm}} \quad (12)$$

2.2.3 电力系统的经济效益指标

随着电网节点负荷的增大，其线路损耗增加，电网对能源的利用率降低，电力系统经济效益降低。在电网电压越限及线路功率裕度指标评估结果的基础上，考虑交通电力耦合密度对电力系统经济效益的影响程度，电网线路损耗 $P_{ij,\text{loss}}$ 的表达式如下^[32]。

$$P_{ij,\text{loss}} = (U_i - U_j) I_{ij} \quad (13)$$

3 仿真流程

鉴于活动-出行-充电需求产生的复杂性，以及交通-电力网络之间耦合度对影响力评估的重要性，仿真流程图如图3所示。

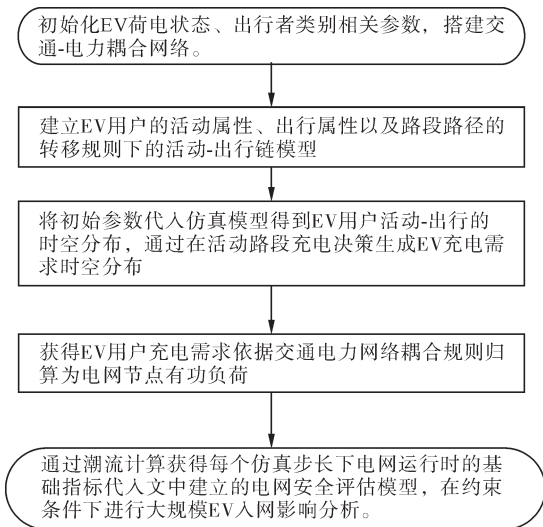


图3 仿真流程图

Fig 3 Flowchart of the simulation

具体流程如下。

1) 设置路网结构参数，包括节点属性、出行和活动路段分类、自由流和活动时长等，设定EV用户的出行者类别及对应初始状态，建立基于出行者类别的路段路径状态矩阵。

2) 遍历每条路径中所有路段，基于EV用户活动-出行链模型生成EV时空分布矩阵。

3) 基于上述矩阵获得EV在活动路段进行充电决策后的充电需求预测结果，根据交通-电力网络耦合关系进行电网安全评估。

4) 比较不同EV渗透率及网络耦合密度下节点电压越限严重度、相对功率裕度以及线路损耗等电网评估指标。

4 算例分析

4.1 算例描述

根据城市某区域路网为基础建立11节点交通网与经过参数调整后的IEEE 33配电网作为算例分析的耦合网络如图4所示，交通网节点属性分别为：居民区(橙色节点1—4)、工业区(粉色节点5—9)和商业区(绿色节点9—10)，全枚举生成87条路段，包含11条活动路段、76条出行路段。

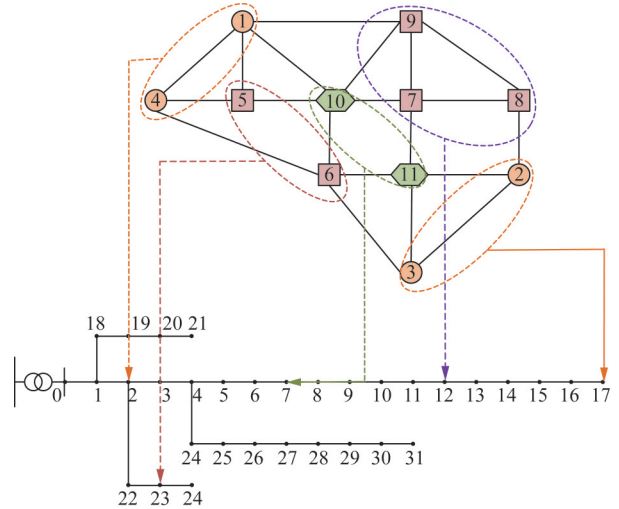


图4 交通-配电耦合网络示例

Fig. 4 A coupled traffic-power network example

考虑到交通-电力网络耦合程度对EV影响力的影响，设置3种交通-电力耦合情境如下(不考虑EV在途充电)。

情境1: 没有EV接入，仅考虑城市基础负荷接入^[2]。

情境 2: 考虑所有交通节点均配备充电站, 即任一活动地点均可进行充电。

情境 3: 多个活动地点共享充电站, EV 用户就近充电, 充电站与网络节点间的关系如表 1 所示。

算例参数说明如下^[16, 33]: 1) 假设该区域共 10 类 EV 用户进行活动-出行链模拟, 假定每类 EV 用户日出发时刻服从正态分布, 初始 EV 的荷电状态服从均匀分布, 出行者类别见表 2。2) 设定区域各 EV 性能参数见表 3。3) 假定 EV 行驶过程不发生事故且严格按照行驶路径匀速行驶。

表 1 情境 3 中共享充电站与电网节点关系

Tab. 1 Relationship between shared charge stations and grid nodes in scenario 3

充电站编号	共享充电站交通网节点	充电站接入电网节点
1	1、4	2
2	2、3	17
3	5、6	23
4	7、8、9	12
5	10、11	7

表 2 出行者分类

Tab. 2 Classification of travelers

出行者数量	出行者类别
0	1
25	2
50	3
75	4
20	5
20	6
200	7
200	8
100	9
160	10

表 3 电动汽车性能参数

Tab. 3 Performance parameters of EVs

每公里耗电量/(kWh·km ⁻¹)	电池容量/(kW·h ⁻¹)	充电功率/kW
0.2	18	15

4.2 基于活动-出行链的 EV 充电负荷需求预测

充电站保证 24 h 供电且各充电站容量充足。活动-出行链的仿真测试区间为 24 h^[34], 获得当日 EV 用户的充电需求时空分布如图 5 所示。

工作日 EV 呈现区分时段的聚集性充电行为, 当日充电负荷峰值将近 1 000 kW 集中在 18 : 00—

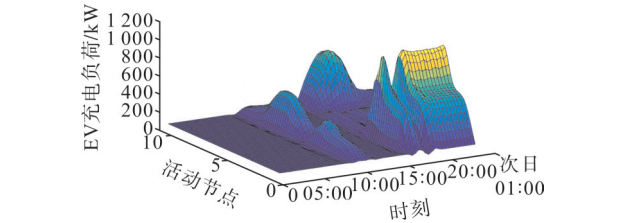


图 5 EV 充电需求时空分布图

Fig. 5 Spatial and temporal distribution of EV charging demand

23 : 00 的 1—5 节点(居民区), 该时间段大部分 EV 用户结束当日活动出行行为后回家, EV 荷电状态降低至下限值产生聚集性充电需求, 处于该活动路段的 EV 用户拥有较长居家时长, 对 EV 的使用需求程度较为松弛, 此时段充电需求以慢充为主, 所以可以在此类区域设置功率较低的充电桩以降低同时段电网的负荷压力, 进而提升电网稳定性^[35]。图中次高峰充电负荷约为 600 kW, 较最高峰少了 400 kW, 出现在 16 : 00—21 : 00 的 10—11 节点(商业区), 节点 10 处位于交通枢纽处, 其交通流量大于节点 11, 此时该区域可以考虑价格调控、政策激励鼓励 EV 错峰充电, 或者鼓励 EV 用户集群响应售出多余电量缓解电网负荷压力, 避免电力系统陷入崩溃^[36-37]。除此以外在 08 : 00—12 : 00 的节点 6—9 (工作区)也产生充电负荷需求约为 300 kW 的小高峰, 该时段由于少部分 EV 初始负荷状态较差, 在完成第一个出行路段后产生小部分充电需求。

4.3 基于耦合网络的 EV 入网的短期安全评估

4.3.1 配电网各节点电压风险评估

基于 EV 充电需求时空分布结果对配电网安全性进行评估。结合图 5—6 给出了分散与聚集情境下节点电压越限风险结果。

结果表明, 分散型的充电站分布电网越限相对平稳且峰值较小, 电网稳定性高于聚集型分布的接入情境。基于电网节点负荷性质, 结果表明, 居民区节点电压越限严重程度最高。晚间大量 EV 充电需求导致电网节点异常脆弱, 电网稳定性差。

4.3.2 相对功率裕度指标

节点相对功率裕度指标的分析可辅助掌握电网各节点当前负荷状态下的电力系统可调控裕度。

节点电压越限指标表明 EV 入网影响程度与节点负荷性质、充电站分布紧密关联, 从 3 类活动性质的充电站所在节点各自选择一个作为评估对象, 在上述设定的 3 种情境下评估节点的相对功率裕度

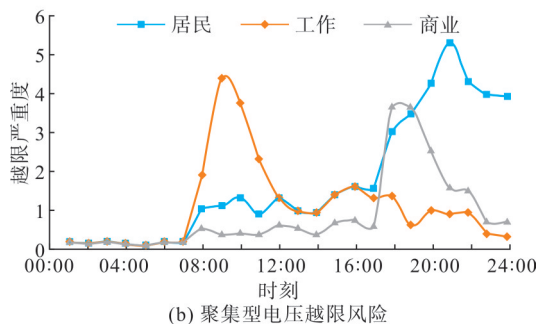
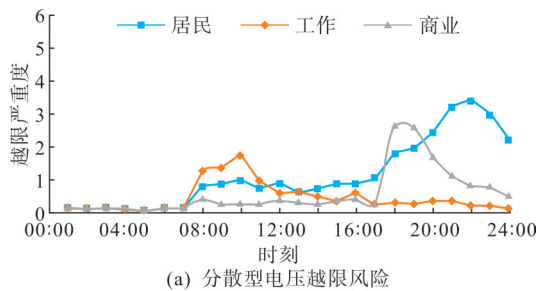


图6 节点电压越限风险评估

Fig. 6 Risk assessment of node voltages exceeding limit

指标如图 7 所示。

纵向对比图 7(a)—(c) 可知，电网节点裕度与节点的活动性质密切相关，居民区 19：00—21：00 的节点相对功率裕度最低，仅为 0.6，工作区 08：30—10：00 最低，约为 0.8，商业区 17：00—19：00 最低，约为 0.75。横向对比图 7(a)—(c) 可知，聚集型耦合时的节点相对功率裕度的峰值远远低于分散型耦合的节点相对功率裕度，该结果表明交通-电力的耦合度影响 EV 入网评估结果，高密度的耦合形式给电网的冲击更大。

4.3.3 配电线路损耗程度分析

为了掌握 EV 入网前后电力系统的经济效益变化，对不同交通-电力耦合情境下 EV 入网前后电网运行的线路有功损耗进行分析。综合考虑节点所连接线路的负荷性质，表 4 给出仿真结果。结果表明，电网随着 EV 的接入有功损耗明显增加，聚集型的高密度耦合情境比分散型的低密度情境电网有功损耗增量更多。其中，由于 EV 的分散型接入，电网有 3 个线路损耗增长率超过 100%；电网由于 EV 的聚集型接入有 5 个线路损耗增长率超过 100%。

从线路负荷性质方面，居民区线路损耗增量比工作区和商业区高，居民区线路负荷损耗增量最高

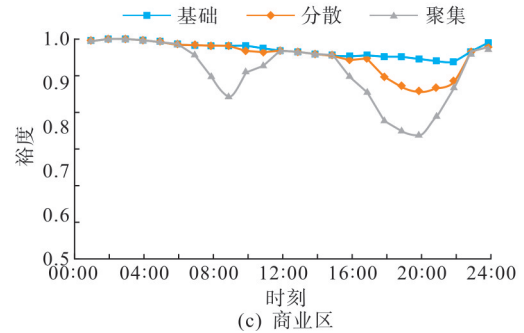
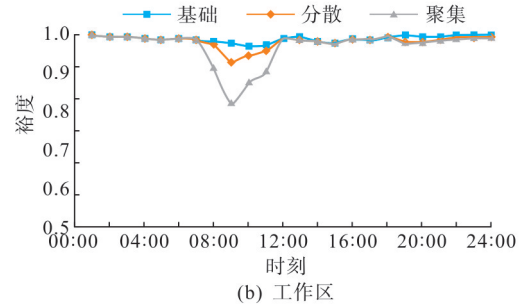
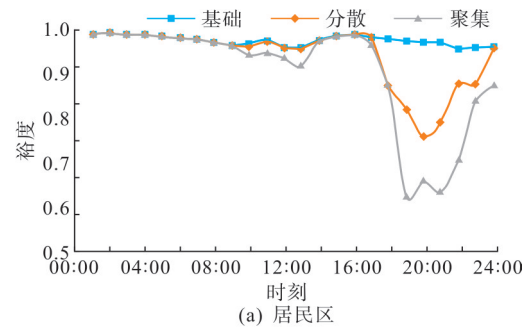


图7 电动汽车入网前后区域节点相对功率裕度

Fig. 7 Relative power margins of nodes in regions before and after grid entry of electric vehicles

表 4 EV 接入前后各支路有功损耗

Tab. 4 Power losses before and after the access of EVs

支路 编号	负荷 性质	基础负荷 /kW	分散入 网/%	聚集入 网/%	分散损耗 增量/%	聚集损耗 增量/%
2	居民区	248.04	363.53	380.40	46.56	53.37
17		0.16	0.69	0.91	342.59	479.75
18		1.72	1.82	1.72	5.77	0.28
31		1.00	2.14	1.08	113.48	7.83
5	工作区	16.95	25.50	34.03	50.48	100.79
12		49.25	79.51	110.28	61.45	123.92
15		5.45	10.92	16.09	100.24	195.03
21		0.71	0.85	0.72	18.46	0.28
23	商业区	2.78	3.07	3.07	10.20	10.45
7		56.29	86.63	117.31	53.89	108.40
29		14.52	22.70	15.64	56.36	7.73

达超过 300%,甚至接近 500%;而工作区线路负荷损耗增量最高不超过 200%,由此证明区域总负荷量越高,对应线路损耗越严重,电力系统的经济效益将随之降低,造成能源的浪费。考虑不同渗透率下电力系统有功损耗比重见表 3, EV 渗透率以 25% 等差增长时系统有功损耗由 7% 增长到 8.9%,随着 EV 数量增大电力系统经济效益降低。

若不对 EV 充电进行有序引导将导致电网运行的经济效益降低。为提升经济效益对电网采取相应的补偿措施,例如分布式与大电网相互补充、协调是为用户提供优质电能最普遍有效的方式^[37-38]。除此以外,优化电网设备运行状态调整电网供需状态降低损耗,配置储能站能从电能充放控制角度改变电网运行潮流分布,进而改善电网损耗情况,有功功率损耗率如表 5 所示。

表 5 有功功率损耗率
Tab. 5 Active power loss rates %

渗透率	系统有功功率损耗比率
0	7.013
25	7.435
50	7.958
75	8.926

5 结论

本文基于用户活动-出行需求特性的交通-电力耦合网络模型研究大规模 EV 入网对电网侧产生的影响,提出计及用户活动理论的活动-出行链模型研究 EV 入网产生的影响力分析,通过算例验证了该模型对 EV 入网研究的有效性。研究结果为当路网充电站分布聚集时,电网节点电压越限严重度峰值处于 4—6 区间,而充电站分布分散时,节点电压越限严重度峰值仅处于 1—3.5 区间,该结果表明 EV 的充电行为与路网充电站分布实际情况相关联;研究结果还表明 EV 充电行为和用户周期性交通行为模式密切相关,居民区节点相对功率裕度在夜间低至 0.6 以下,而工作区最低为 0.8 以上,商业区最低值也在 0.7~0.8 区间。

考虑用户活动-出行特性以预测 EV 的充电需求时空分布,为评估配电网在 EV 接入后安全性评估提供负荷输入,从“人-车-网”相关联的视角评估 EV 入网影响。基于该工作,在后续研究中将进一步对

电网韧性评估以及配电网运行风险预测等方面进行展开,并考虑相关引导激励策略以引导用户改变活动-出行行为,将 EV 变成辅助电网调度的有力支撑,进而提高配电网安全稳定性。本文建立的活动出行链模型能有效预测 EV 充电需求,但是在仿真中忽视了一些影响因素,后续将考虑道路的极端天气情况对于 EV 出行成本的影响以及对用户活动地点选择的影响,并深入考虑并建立道路交通流量与电网电价相互作用下的耦合网络均衡模型。

参考文献

- [1] 唐白泽洋,巨健,姜炎君,等.电动汽车参与电网调峰的关键技术研究综述[J].电力需求侧管理,2022,24(6):25-31.
TANG Xisheng, DENG Wei, LI Ningning, et al. Control technologies of micro-grid operation based on energy storage [J]. Power Demand Side Management, 2012, 32(3): 99-103.
- [2] 颜湘武,王庆澳,卢俊达,等.计及电动汽车和柔性负荷的配电网能量调度[J].电力系统保护与控制,2023,51(17):69-79.
YAN Xiangwu, WANG Qing'ao, LU Junda, et al. Microgrid energy scheduling with electric vehicles and flexible loads [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(17): 69-79.
- [3] 林湘宁,王伟名,随权,等.主动配电网-充换电站群-智慧社区群分层优化调度策略[J].广东电力,2024,37(10):25-37.
LIN Xiangning, WANG Weiming, SUI Quan, et al. Hierarchical optimal scheduling strategy for active power distribution network, charging and switching station cluster and smart community cluster [J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(10): 25-37.
- [4] 邵尹池,穆云飞,余晓丹,等.“车-路-网”模式下电动汽车充电负荷时空预测及其对配电网潮流的影响[J].中国电机工程学报,2017,37(18):5207-5219.
SHAO Yinchu, MU Yunfei, YU Xiaodan, et al. A spatial-temporal charging load forecast and impact analysis method for distribution network using EVs-traffic-distribution model [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(18): 5207-5219.
- [5] 潘胤吉,邱晓燕,肖建康.电动汽车充电负荷的时空双层优化调度策略[J].南方电网技术,2018,12(5):62-70.
PAN Yinji, QIU Xiaoyan, XIAO Jiankang. Optimal temporal and spatial Bi-Layer scheduling strategy of electric vehicles charging load [J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(5): 62-70.
- [6] 杨昕然,吕林,向月,等.“车-路-网”耦合下电动汽车恶劣充电场景及其对城市配电网电压稳定性影响[J].电力自动化设备,2019,39(10):102-106.
YANG Xinran, LÜ Lin, XIANG Yue, et al. Degradation charging scenarios and impacts on voltage stability of urban distribution network under ‘EV-road-grid’ coupling [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(10): 102-106.
- [7] 王鹤,余中枢,李筱婧,等.基于主成分分析方法的多类型电动汽车接入配电网的综合风险评估[J].电力自动化设备,2021,41(11):57-65.
WANG He, YU Zhongshu, LI Xiaojing, et al. Comprehensive

- risk assessment of multiple types of electric vehicles connected to distribution network based on principal component analysis method enhanced publishing [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(11): 57–65.
- [8] 郑远硕, 李峰, 董九玲, 等. “车-路-网”模式下电动汽车充电时空灵活性优化调度策略[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(12): 88–97.
- ZHENG Yuanshuo, LI Feng, DONG Jiuling, et al. Optimal dispatch strategy of spatio-temporal flexibility for electric vehicle charging and discharging in vehicle-road-grid mode[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(12): 88–97.
- [9] 史文超, 吕林, 高红均, 等. 考虑需求响应和电动汽车参与的主动配电网经济调度[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(11): 41–51.
- SHI Wenchao, LÜ Lin, GAO Hongjun, et al. Economic dispatch of active distribution network with participation of demand response and electric vehicle [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(11): 41–51.
- [10] 盛裕杰, 郭庆来, 刘梦洁, 等. 多源数据融合的用户充电行为分析与充电设施规划实践[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(12): 151–162.
- SHENG Yujie, GUO Qinglai, LIU Mengjie, et al. User charging behavior analysis and charging facility planning practice based on multi-source data fusion [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(12): 151–162.
- [11] 张晨彧, 丁明, 张晶晶. 基于交通出行矩阵的私家车充电负荷时空分布预测[J]. *电工技术学报*, 2017, 32(1): 78–87.
- ZHANG Chenyu, DING Ming, ZHANG Jingjing, et al. A temporal and spatial distribution forecasting of private car charging load based on origin-destination matrix [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society* [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017(1): 78–87.
- [12] 张洪财, 胡泽春, 宋永华, 等. 考虑时空分布的电动汽车充电负荷预测方法[J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(1): 13–20.
- ZHANG Hongcai, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. A prediction method for electric vehicle charging load considering spatial and temporal distribution [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(1): 13–20.
- [13] 林铭蓉, 胡志坚, 高明鑫, 等. 基于时空规律的电动汽车负荷建模及其自动需求响应[J]. *南方电网技术*, 2022, 16(1): 99–107.
- LIN Mingrong, HU Zhijian, GAO Mingxing, et al. Electric vehicle load modeling and automatic demand response based on space time laws [J]. *Southern Power System Technology*, 2022, 16(1): 99–107.
- [14] 李晓涵, 曹伟. 弹性充电需求下电动汽车调频激励机制及控制策略[J/OL]. *中国电力*, 1–14[2024–03–01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20240829.1354.002.html>.
- LI Xiaohan, CAO Wei. Frequency regulation incentive mechanism and control strategy for electric vehicles under elastic charging demand[J]. *Electric Power*, 1–14[2024–03–01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20240829.1354.002.html>.
- [15] 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.
- [16] 蒋卓臻, 向月, 刘俊勇, 等. 集成电动汽车全轨迹空间的充电负荷建模及对配电网可靠性的影响[J]. *电网技术*, 2019, 43(10): 3789–3800.
- JIANG Zhuozhen, XIANG Yue, LIU Junyong, et al. Charging load modeling integrated with electric vehicle whole trajectory space and its impact on distribution network reliability [J]. *Power System Technology*, 2019, 43(10): 3789–3800.
- [17] 周椿奇, 向月, 童话, 等. 轨迹数据驱动的电动汽车充电需求及V2G可调控容量估计[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(12): 46–55.
- ZHOU Chunqi, XIANG Yue, TONG Hua, et al. Trajectory-data-driven estimation of electric vehicle charging demand and vehicle-to-grid regulable capacity enhanced publishing [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(12): 46–55.
- [18] 刘志强, 张谦, 朱熠, 等. 计及车-路-站-网融合的电动汽车充电负荷时空分布预测[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(12): 36–45.
- LIU Zhiqiang, ZHANG Qian, ZHU Yi, et al. Spatial-temporal distribution prediction of charging loads for electric vehicles considering vehicle-road-station-grid integration enhanced [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022(12): 36–45.
- [19] 徐青山, 蔡婷婷, 刘瑜俊, 等. 考虑驾驶行为习惯及出行链的电动汽车充电站站址规划[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(4): 59–65.
- XU Qingshan, CAI Tingting, LIU Yujun, et al. Location planning of charging stations for electric vehicles based on drivers' behaviours and travel chain [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(4): 59–65.
- [20] 刘超, 李青, 马明明, 等. 基于DATA模型的电动汽车充电需求时空演化规律分析[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(12): 86–94.
- LIU Chao, LI Qing, MA Mingming, et al. Analysis on spatial-temporal evolution law of electric vehicle charging demand based on dynamic activity-travel assignment model [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(12): 86–94.
- [21] 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.
- [22] 陈镜如. 基于出行链的电动汽车快速充电设施布局规划研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
- [23] DING C, LIN Y Y, XIE B L, et al. A tour-based analysis of travel mode choice accounting for regional transit service [J]. *Journal of Central South University*, 2015, 22(1): 402–408.
- [24] CHUAN D, YAO Y L, CHAO L. Exploring the influence of built environment on tour-based commuter mode choice: a cross-classified multilevel modeling approach [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2014(32): 230–238.
- [25] BRUNOW S, GRÜNDER M. The impact of activity chaining on the duration of daily activities [J]. *Transportation*, 2012(40): 5–19.
- [26] JUN Y, FUZHANG W, JUN Y, et al. Charging demand analysis framework for electric vehicles considering the

- bounded rationality behavior of users [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020(119): 105952 – 105952.
- [27] LI Q, LIAO F. Incorporating vehicle self-relocations and traveler activity chains in a bi-level model of optimal deployment of shared autonomous vehicles [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2020(140): 151 – 175.
- [28] LI Q, LIAO F, TIMMERMAN H J P, et al. Incorporating free-floating car-sharing into an activity-based dynamic user equilibrium model: a demand-side model [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2018(107): 102 – 123.
- [29] ETTEMA D, BASTIN F, POLAK J, et al. Modelling the joint choice of activity timing and duration [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2007, 41 (9): 827 – 841.
- [30] 史文超, 李晓明, 王孝琳, 等. 配电网脆弱性评估方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(12): 125 – 131.
- SHI Wenchao, LI Xiaoming, WANG Xiaolin, et al. Vulnerability assessment method for distribution network [J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2018, 30(12): 125 – 131.
- [31] 李禹鹏, 冯煜尧, 冯楠, 等. 基于戴维南等值和支路传输功率极限的电压稳定评估方法[J]. 智慧电力, 2019, 47(1): 13 – 18, 40.
- LI Yupeng, FENG Yuyao, FENG Nan, et al. Evaluation method for voltage stability based on thevenin equivalent and power transfer limit of branch[J]. Smart Power. 2019, 47(1): 13 – 18, 40.
- [32] 王锡凡. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社. 2003: 140 – 147.
- [33] 赵黄江, 向月, 刘俊勇, 等. 基于改进配电网安全域的规模化电动汽车入网影响分析[J]. 电力自动化设备, 2021, 41 (11): 66 – 73.
- ZHAO Huangjiang, XIANG Yue, LIU Junyong, et al. Analysis on impact of large-scale electric vehicles integration based on improved security region of distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41 (11): 66 – 73.
- [34] 金国彬, 李双, 李国庆, 等. 考虑电动汽车集群时空能量可控特性的交直流混合配电网紧急优化调度[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(7): 102 – 109.
- JIN Guobin, LI Shuang, LI Guoqing, et al. Emergency optimal dispatch of AC/DC hybrid distribution network considering spatio-temporal energy controllable characteristics of electric vehicle clusters [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(7): 102 – 109.
- [35] 田梦瑶, 汤波, 杨秀, 等. 综合考虑充电需求和配电网接纳能力的电动汽车充电站规划[J]. 电网技术, 2021, 45(2): 498 – 509.
- TIAN Mengyao, TANG Bo, YANG Xiu, et al. Planning of electric vehicle charging stations considering charging demands and acceptance capacity of distribution network [J]. Power System Technology, 2021, 45(2): 498 – 509.
- [36] 刘峻岐, 蒋姝俊, 王照琪, 等. 基于时空耦合关联分析的电动汽车集群可调度能力评估[J]. 电力建设, 2021, 42(12): 83 – 92.
- LIU Junqi, JIANG Shujun, WANG Zhaoqi, et al. Dispatchable capability of eclectic vehicle clusters considering temporal-spatial characteristics [J]. Electric Power Construction, 2021, 42(12): 83 – 92.
- [37] 侯慧, 唐俊一, 王逸凡, 等. 价格与激励联合需求响应下电动汽车长时间尺度充放电调度[J]. 电力系统自动化, 2022, 46 (15): 46 – 55.
- HOU Hui, TANG Junyi, WANG Yifan, et al. Long-time scale charging and discharging scheduling of electric vehicles under price and incentive joint demand response [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(15): 46 – 55.
- [38] 冯仕杰, 刘韬, 潘萨, 等. 基于分层优化的电动汽车有序充电策略[J]. 电气工程学报, 2021, 16(3): 137 – 144.
- FENG Shijie, LIU Tao, PAN Sa, et al. An orderly charging strategy for electric vehicles based on hierarchical optimization [J]. Journal of Electrical Engineering, 2021, 16 (3): 137 – 144.

收稿日期: 2023-06-05; 网络首发日期: 2024-04-15

作者简介:

孙志颖(1998), 女, 硕士研究生, 研究方向为交通规划与智能电网, 1305575228@qq.com;

李青(1988), 女, 通信作者, 副研究员, 研究生导师, 博士, 研究方向为交通系统的建模与优化, liqing321@nuist.edu.cn;

张凯(1965), 男, 教授, 博士, 研究方向为智能出行, zhark-zhangkai@163.com。