

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2024.01.001

路网耦合下计及电动汽车V2G潜力的充电站 选址定容研究

Siting and sizing of electric vehicle charging stations under the coupling of transport and power networks considering V2G potential

孙雨乐¹, 漆淘懿^{1a,2}, 赵宇明³, 叶承晋^{1a*}, 惠红勋²

SUN Yule¹, QI Taoyi^{1a,2}, ZHAO Yuming³, YE Chengjin^{1a*}, HUI Hongxun²

(1. 浙江大学 a. 电气工程学院; b. 工程师学院, 杭州 310027; 2. 澳门大学 智慧城市物联网国家重点实验室, 澳门 999078; 3. 深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518020)

(1.a. College of Electrical Engineering; b. Polytechnic Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. State Key Laboratory of Internet of Things for Smart City, University of Macau, Macau 999078, China; 3. Shenzhen Power Supply Bureau Company Limited, Shenzhen 518020, China)

摘要: 电动汽车具备交通运输和移动负荷的双重特性, 其大规模的集中充电过程会对交通网和电网同时造成冲击。利用电动汽车的移动属性和车辆到电网(V2G)技术, 能够在时空层面优化其充电需求, 不仅可以抑制上述冲击, 还可以为电网提供额外的储能容量, 协助电网削峰填谷和促进新能源消纳。以电网投资建设的充电站为例, 提出一种同时考虑交通网和电网因素的充电站选址定容策略, 在满足电动汽车充电需求的前提下, 优化电动汽车的充电需求以最大化可用储能容量。首先, 建立动态交通网模型, 结合Floyd算法与区域特性精确模拟电动汽车的行驶路径, 预测电动汽车充电负荷的时空特性。其次, 基于电动汽车的充电负荷预测结果, 以最大化储能容量、充电负荷平均分布、车辆驻车时间最长3个指标初步确定电站选址, 然后再根据全时段的统计结果确定充电站的最优选址与容量。最后, 以某市主城区的部分实际道路为例, 预测充电负荷的时空分布, 以最大储能容量为目标完成充电站的选址定容, 并分析了优化结果对交通网和电网的影响, 结果证明了所提方法的有效性。

关键词: 电动汽车; V2G技术; 道路交通网; 时空分布模型; 选址定容

中图分类号: TK 01 文献标志码: A 文章编号: 2097-0706(2024)01-0001-10

Abstract: Electric vehicles are both transportation means and mobile loads. Their large-scale and intensive charging will impact the transportation network and the power grid at the same time. In view of EVs' mobile attribute, their charging demands can be optimized in time and space dimensions through the vehicle-to-grid(V2G) technology. The technology can not only alleviate the aforementioned impact, but also provide energy storage capacity to the power grid, so as to promote the accommodation of renewable energy resources and peak load regulation of the power grid. Taking a charging station invested by State Grid Corporation as the example, a siting and sizing strategy for the charging station that considers transportation and power networks is proposed. On the premise of satisfying the charging demands of electric vehicles, the strategy optimizes the charging demand to maximize the energy storage capacity of the station. Firstly, based on the dynamic traffic network model, the driving paths of electric vehicles are accurately simulated by Floyd algorithm and regional characteristics, to predict the spatial and temporal characteristics of electric vehicle charging loads. Secondly, based on the prediction results, the preliminary station location is determined by three goals, maximizing the energy storage capacity, smoothing the charging load, and the extending the parking time in the station. Then, the optimal location and capacity of the charging station are adjusted according to the statistical results from the whole period. Taking the roads in a main urban area as an example, the spatial and temporal characteristics of the charging load are predicted, and the optimal location and capacity of the charging station aiming at maximizing its energy storage capacity is designed. The influence of this design on the transportation network and power grid is analyzed, which proves the effectiveness of the proposed strategy.

基金项目: 南方电网公司重点科技项目(090000KK52220020)
Key Technology Project of China Southern Power Grid Company Limited(090000KK52220020)

Keywords: electric vehicle; V2G technology; traffic network; spatio-temporal distribution model; siting and sizing

0 引言

在能源安全和“双碳”目标的双重驱动背景下,我国将电动汽车(Electric Vehicle, EV)的发展作为交通能源转型的重要战略^[1-2]。国际能源署(International Energy Agency, IEA)在《2021 年全球电动汽车展望报告》中指出,全球 EV 保有量截至 2020 年已超过 1 100 万辆,中国以约 550 万辆的存量成为全球最大市场^[3]。

为满足新增电动汽车的充电需求,电动汽车充电站的选址定容问题成为一个值得研究的重要问题。电动汽车作为大功率、随机性的冲击负荷,若其大量且无序地接入电网,可能会导致电网线路阻塞、电压越限、网损增加等多重问题^[4-5]。与此同时,电动汽车又兼具储能特性。当电网中负荷过高时,可以利用电动汽车向电网进行放电,充当电力系统中的电源;当电网中负荷较低时,可以利用电动汽车进行充电,储存电网中过剩的电量,减少电能浪费,这种方式被称为电动汽车的车辆到电网(Vehicle to Grid, V2G)技术^[6]。通过上述网荷互动方式,不仅可以缓解电网效率低、可再生能源波动等运行问题,还可以为用户创造额外的收益^[7-8]。因此,通过合理规划充电站的位置,优化不同地点、不同时段电动汽车储能调节潜力显得尤为重要。近年来网约车数量激增,其中大部分都是电动汽车。本文以电动网约车为例,探索其对充电桩分布的影响。

近年来对于电动汽车 V2G 技术的研究较多,文献[9]针对 V2G 在工作时造成的谐波含量高、功率因数低等问题,对充电桩内部电路进行重新设计以提高电网质量。文献[10]基于模糊控制的改进比例谐振控制技术,进一步提高了电力系统的稳定性和动态性能。上述研究通过电力电子技术对 V2G 技术进行控制与优化。文献[11]应用整数规划求解电动汽车充放电两阶段优化模型,以有效降低峰荷并平滑负荷曲线。文献[12]针对调峰控制策略,运用粒子群优化算法对电动汽车的充放电功率进行优化。以上文献都是从电动汽车储能特性与电网互动角度进行研究,探索电动汽车 V2G 技术如何更好地进行削峰填谷、提高电网稳定性。

由此可见电动汽车 V2G 技术具有极强的利用价值。但是现有研究多基于充电站的位置确定的情况,同时对于交通网络中车流量的分布考虑仍不足,由此可能造成模型不够准确。现有对于充电站规划的研究中,文献[13]综合考虑充电站的经济运行和车辆动态功率模型进行充电站规划,文献[14]

根据电动汽车的充电需求,结合投资商的意愿对充电站进行选址定容。以上研究均是针对社会投资的充电站,这部分充电站总是以最优的经济效益作为选址的重要指标。然而,对于电网投资建设的充电站,其具有一定的公共属性,是根据相关政策要求的车桩比,随着电动汽车数量增加而必须建设的。这部分充电桩在建设时无需考虑建设投资成本。除了满足车主充电需求,通过合理规划充电站,提高充电站拥有利用率、最大化电动汽车 V2G 调节潜力也是需要考虑的重要因素。因此,本文从城市规划角度出发,充分考虑电动汽车在路网中的分布情况,以电网建设的充电站为例,提出了计及电动汽车 V2G 潜力的充电站选址定容方法,为电网公司提供参考,以获得最好的社会效益。首先,构建交通网并通过 Floyd 算法对电动汽车的行驶路径进行模拟,预测出充电负荷的时空分布。然后,从所有网络节点中分时段求取最优位置,使所选充电站在满足路网中所有电动汽车充电需求的同时,最大化电网可用的储能容量。其次,根据各时段的充电站选择综合分析,求出适合全时段的充电站位置,并根据各时段的停车需求确定每个充电站的充电桩数量。

最后,以某市辖区路网拓扑结构为例,对所提出的模型进行验证。结果表明,所提方法对城市电网投资的充电站选址定容规划具有一定的指导意义。

1 计及用户习惯的电动汽车储能建模

1.1 电动汽车使用习惯建模

电动汽车车主的行为习惯决定了电动汽车的日行驶里程、起始充电时刻、停车时间以及起始充电的电量,是影响储能容量计算的关键因素。电动汽车一般分为电动私家车、电动商务车、电动公交车、电动网约车和出租车 4 大类^[15]。近年来,网约车数量激增,在城市交通运输市场中的比例不断增加。截至 2022 年 1 月,各地共发放网约车驾驶员证 398.8 万本、车辆运输证 158.3 万本;1 月份订单总量达到 70 420.3 万单^[16]。因此,可以认为网约车已经成为交通网中不可或缺的重要组成部分,具有广阔的研究前景。

日行驶里程反映电动汽车在 1 天内使用多少电量,进而影响目的地的预测。通过拟合可以得到日行驶里程的概率密度函数为

$$f_D(s) = \frac{1}{s\sigma_D\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln s - \mu_D)^2}{2\sigma_D^2}\right], \quad (1)$$

式中: s 为每天电动汽车行驶的路程,km; μ_D 和 σ_D 分别为函数的期望值和标准差。

电网网约车的出行时刻由工作时间、出行习惯决定,其典型的出行时间的概率分布如图 1 所示。

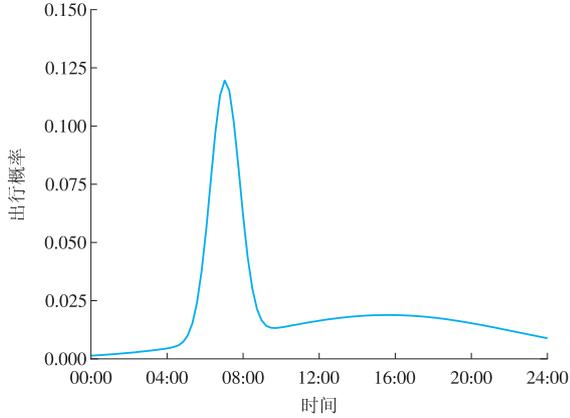


图 1 电网网约车出行时间概率分布

Fig. 1 Probability distribution of electric ride-hailing vehicles' departure time

电网网约车的出行主要集中在白天,使用量较大的时段为 08:00—21:00,因此可以认为电网网约车的出行时刻高峰时段为 06:00—08:00^[17],根据文献[18]中提供的函数拟合数据,可以得到电网网约车的出行时刻满足的分布概率为

$$f_B(t) = \lambda_1 e^{-\frac{(t-\alpha_1)^2}{\beta_1}} + \lambda_2 e^{-\frac{(t-\alpha_2)^2}{\beta_2}}, \quad (2)$$

式中: $\lambda_1 = 0.389$, $\alpha_1 = 7.046$, $\beta_1 = 1.086$, $\lambda_2 = 0.066$, $\alpha_2 = 15.610$, $\beta_2 = 9.667$ 。

同时,电网网约车的停车时间、初始电量也具备一定的随机性,与车主的用车习惯以及车辆用途也有着密切关系。从大数据统计角度来看,可以认为电网网约车的分布服从正态分布^[19]。正态分布的概率密度函数为

$$f(T) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(T-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (3)$$

式中: T 为电网网约车的停车时间, h ; μ 为均值; σ 为标准差。

1.2 聚合电动汽车 V2G 储能潜力建模

电动汽车能够提供的 V2G 储能容量与电动汽车的数量,电动汽车的状态(汽车的起始荷电状态(State of Charge, SOC)、电动汽车的功率、工作效率、百公里耗电量等)、车主的用车习惯(车辆的出发时间、停车时间)有关。

首先对储能容量的可利用服务时间进行建模。假设在电动汽车作为储能参与调节的过程中都采用恒功率模式,单辆电动汽车可持续服务的时间为

$$\begin{cases} T_{ch,n} = \frac{(S_{OC, ch, n} - S_{OC, n}(t_i)) \times E_{bat, n}}{P_{ch, n} \times \eta_{ch, n}} \\ T_{dis, n} = \frac{(S_{OC, n}(t_i) - S_{OC, dis, n}) \times E_{bat, n}}{P_{dis, n} / \eta_{ch, n}} \end{cases}, \quad (4)$$

式中: T_{ch} , T_{dis} 分别为单辆电动汽车参与储能的充电时间放电时间; $S_{OC, n}(t_i)$ 为 t_i 时刻第 n 辆汽车的电池荷电状态; $S_{OC, ch}$ 为参与储能的电动汽车期望达到的充电电量; $S_{OC, dis}$ 为预留出行的能量比; $E_{bat, n}$ 为第 n 辆电动汽车的电池可用容量; $P_{ch, n}$, $P_{dis, n}$ 与 $\eta_{ch, n}$, $\eta_{dis, n}$ 分别为第 n 辆电动汽车的充放电功率和充放电效率。

基于电动汽车的可用服务时间,并对车辆数进行累加,可以求得聚合储能容量。本文将多个电动汽车的 V2G 储能进行整体聚合,计算全部储能容量。在调度优化计算时只需要一个集中的充放电变量,包括电动汽车的充放电功率以及可用的储能容量,具体聚合过程如下。

1.2.1 电动汽车接入充电桩的总功率

$$P_{ch, total, t} = \sum \lambda P_{ch, t}, \quad (5)$$

$$P_{dis, total, t} = \sum \lambda P_{dis, t}, \quad (6)$$

$$P_{car, t} = P_{dis, total, t} + P_{ch, total, t}, \quad (7)$$

$$\lambda = \begin{cases} 1 & \text{充电} \\ -1 & \text{放电} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}, \quad (8)$$

式中: $P_{ch, total, t}$, $P_{dis, total, t}$ 分别为 t 时刻电动汽车总的充电、放电功率; λ 为车辆的充放电状态。

1.2.2 电动汽车总可用储能容量

基于单辆的电动汽车储能容量进行求解,对一定时间段内的单辆电动汽车储能容量进行累加,可以得到时间段内可用的总的储能总量。计算公式为

$$E_{total, ch}(T) = \lambda E_{bat, n} \sum_{n=1}^N \sum_{t=t_1}^{t_2} (S_{OC, ch, n} - S_{OC, n}(t)), \quad (9)$$

$$E_{total, dis}(T) = \lambda E_{bat, n} \sum_{n=1}^N \sum_{t=t_1}^{t_2} (S_{OC, n}(t) - S_{OC, dis, n}), \quad (10)$$

式中: $E_{total, ch}(T)$, $E_{total, dis}(T)$ 为时间段 T 内的可用储能容量总和; t_1 和 t_2 为时间段 T 的起始时间和结束时间; N 为参与调度的电动汽车数量。

此外,电动汽车的充电速度不应超过其最大充电功率的限制,放电速度不应超过电动汽车的额定功率。其表达式为

$$\begin{cases} 0 \leq P_{n, ch, t} \leq P_{n, ch, t, max} & t \in T_{ch, n} \\ P_{n, ch, t} = 0 & t \notin T_{ch, n} \end{cases}, \quad (11)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{n, dis, t} \leq P_{n, dis, t, max} & t \in T_{dis, n} \\ P_{n, dis, t} = 0 & t \notin T_{dis, n} \end{cases}, \quad (12)$$

式中: $P_{n, ch, t, max}$, $P_{n, dis, t, max}$ 分别为第 n 辆电动汽车在 t 时

刻的最大充电功率和额定放电功率。

2 计及动态车流的交通网模型与目标函数的建立

2.1 动态交通网模型

在已有电动汽车与电网交互的研究中,一般采用静态交通网模型进行研究,交通流量并非随时间而改变。为了进一步细化储能的计算方法,本文构建动态交通网模型,将一天分为7个时间段(早高峰、上午、午间、下午、晚高峰、晚间、其余时段)根据时间变动更新每个时段的路段流量,动态交通网模型可以表示为

$$\begin{cases} G = (V, E, H, K) \\ V = \{v_i | i = 1, 2, \dots, u\} \\ E = \{v_{ij} | i \neq j\} \\ H = \{t | t = 1, 2, \dots, T\} \\ K = \{k_{ij}(t) | t \in H\} \end{cases}, \quad (13)$$

式中: G 为交通网集合; V 为交通网中所有节点的集合,共有 u 个; E 为交通网中路段的集合; H 为划分的时间段集合, $T = 7$; K 为路段的权重集合; v_i 为交通网中第 i 个节点; v_{ij} 为连接第 i 个节点和第 j 个交通网节点的路段; $k_{ij}(t)$ 为 t 时段内路段 v_{ij} 的权值。交通网集合 G 中各节点间的连接关系用邻接矩阵 D 来描述。矩阵 D 的元素 d_{ij} 的表达式为

$$d_{ij} = \begin{cases} k_{ij}(t) & v_{ij} \in E \\ 0 & v_i = v_j \\ \inf & v_{ij} \notin E \end{cases} \quad (14)$$

道路拓扑结构如图2所示,其生成的矩阵 D 如式(15)所示。

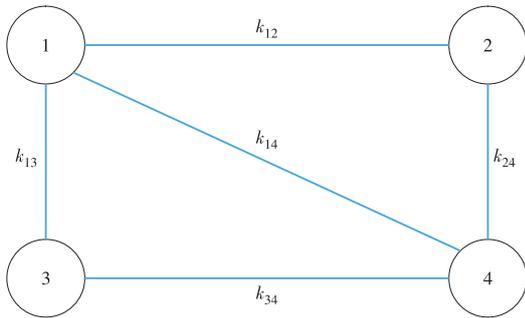


图2 道路拓扑结构示例

Fig. 2 Topology of the test roads

$$D = \begin{bmatrix} 0 & k_{12} & k_{13} & k_{14} \\ k_{12} & 0 & \inf & k_{24} \\ k_{13} & \inf & 0 & k_{34} \\ k_{14} & k_{24} & k_{34} & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

在出行过程中,电动汽车车主往往最关心车辆的行驶时间,而行驶时间与行驶路程与行驶速度密切相关。一般来说,行驶路程在确定路线后较容易

获取,是一个静态常量;行驶速度则与道路的容量,车流量等因素密切相关,是一个动态变量。故本文引入速度-流量模型计算车辆行驶速度,进而方便计算总行程需要的时间。电动汽车行驶速度 v_{ij} 表达式为^[20]

$$\begin{cases} v_{ij}(t) = \frac{v_{ij, \max}}{1 + \left(\frac{Q_{ij}(t)}{C_{ij}}\right)^w} \\ w = a + b \left(\frac{Q_{ij}(t)}{C_{ij}}\right)^\gamma \end{cases}, \quad (16)$$

式中: $v_{ij, \max}$ 为路段 ij 规定的最高行驶速度; C_{ij} 为路段 ij 的通行能力,由道路等级决定; $Q_{ij}(t)$ 为 t 时刻路段 ij 的车流量; $Q_{ij}(t)$ 与 C_{ij} 的比值为 t 时刻路段的饱和度; a, b, γ 为道路的自适应系数,由道路的等级确定。

2.2 路径选择模型

通过模拟电动汽车的行驶路径,能更好地预测出电动汽车充电负荷的时空分布,这是充电站规划的必要条件。

2.2.1 网络节点关系(OD)分析法

OD分析法广泛运用于交通仿真和道路规划,进行OD分析需要的信息包括地理信息、交通网结构和电动汽车的出行信息^[21]。对于城市网络而言,通过历史数据可获取不同时间段下电动汽车在交通网中的分布情况,根据路段的交通量反推得到OD矩阵,OD矩阵正是OD分析的核心。对于电动网约车来说,OD矩阵 $B_{m \times m}^T$ 由7个矩阵组成,其中 T 代表矩阵 B 所属时间段, m 代表交通网的总节点数。 $B_{m \times m}^T$ 用于表示在时间段 T 内交通起始点之间的通行量。利用式(17)将 $B_{m \times m}^T$ 矩阵转化为目的地概率矩阵 $C_{m \times m}^T$,从而通过 $C_{m \times m}^T$ 矩阵可以得到车辆出行的概率分布。

$$c_{ij}^T = \frac{b_{ij}^T}{\sum_{j=1}^m b_{ij}^T}, \quad 1 \leq i \leq m, \quad (17)$$

式中:矩阵元素 b_{ij}^T ($1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n$)代表在 T 时段内在以节点 i 为出发地、节点 j 为目的地的电动汽车总数量; c_{ij}^T ($1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n$)代表在 T 时段内在以节点 i 为出发地的电动汽车选择节点 j 作为目的地的概率; c_{ii}^T 为停在原地并未行驶的电动汽车的概率。

2.2.2 Floyd算法

目前现有的路径选择算法基本分为Dijkstra算法与Floyd算法^[22]。Dijkstra算法能够解决从某一点出发到其他各点的最短路径选择问题,因此是一种

能够解决有向图和无向图的单源最短路径问题^[23]。Floyd算法是典型的多源最短路径算法,又称为插点法,是一种用于寻找给定的加权图中多源点之间最短路径的算法。主要特点是需要用邻接矩阵来储存边,并通过考虑最佳子路径来得到最佳路径^[24-27]。2种算法各有优劣,相比较而言,首先,Dijkstra算法不能处理负权图,即每条道路的权重值必须是正数才可使用,而Floyd算法可以,算法适用范围更广。其次,Dijkstra算法更适合处理单源最短路径,Floyd算法更适合处理多源最短路径。就本文而言,由于本文需要处理多源路径,同时为了降低编程难度,因此Floyd算法更加适合。

Floyd算法用于求取两点之间的最短路径,算法的基本思想是通过迭代地比较所有可能的路径,从而找到图中任意两个节点之间的最短路径。其算法流程图如图3所示。

首先,对于生成的目的节点和起始节点,最终目标是求出到达目的地行驶最短时间与行驶路径。在本文研究中,首先根据选定道路的路程与对应道路的行驶速度可以计算出每条道路的行驶时间,设置起始节点与目的节点初始的最短时间为它们之间连接道路的行驶时间,如果2个节点之间没有道路相连,则设置为无穷大。

然后,通过对所有可能的中间节点进行遍历,依次考虑每个节点作为中间节点时,是否可以通过这个节点缩短行驶时间。对于每一对节点*i*和*j*,以及每一个中间节点*r*,比较当前的最短时间和通过节点*r*的时间之和是否更短。如果更短,则更新最短时间以及路径中的中间节点。通过多次迭代,不断更新最短时间和路径中的中间节点,直到所有的节点都被作为中间节点考虑过。

最终,得到了每一对节点之间的最短时间和行驶路径,根据这一信息可以模拟电动汽车的行驶路径,从而进行充电站的选址定容研究。

本文通过OD分析法模拟电动汽车的行驶路径。电动汽车的初始位置由统计数据给定,通过OD分析法确定电动汽车的目的地。确定出发地和目的地后运用Floyd算法求解最短路径。车辆到达所选目的地后,将此目的地视为下一次行程的出发地,同时通过OD分析法再次确定下一次行程的目的地,重复以上过程即可不断模拟电动汽车行驶路线。

2.3 目标函数建立

根据交通网节点和电网节点的数量确定目标的充电站数量,通过对充电站和充电桩进行合理规

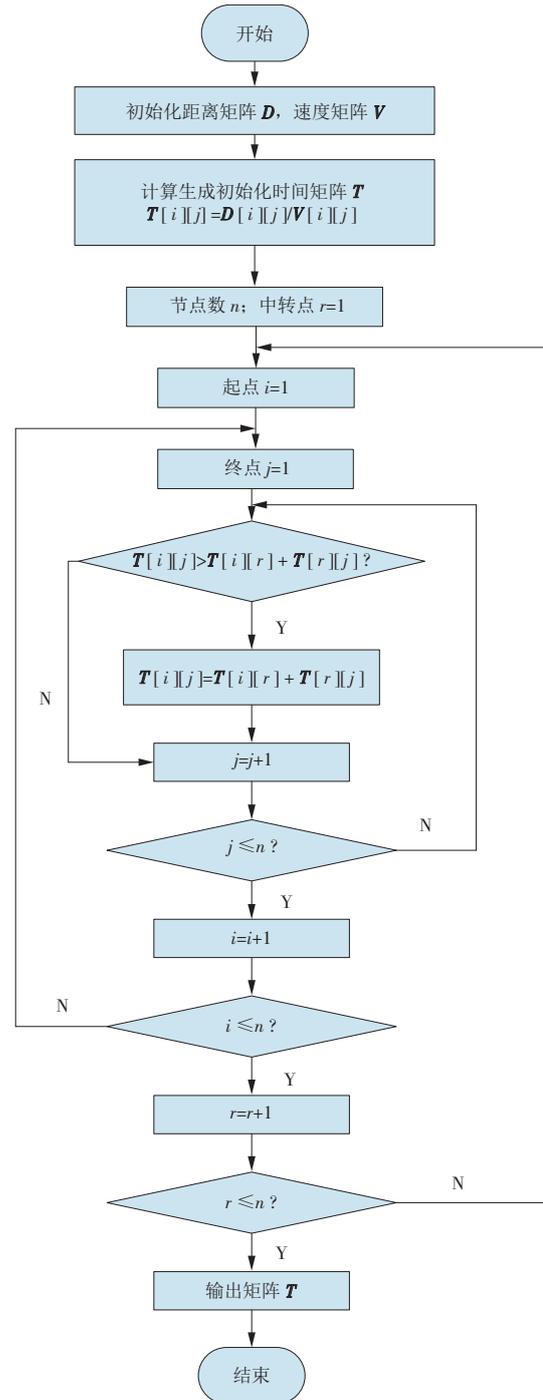


图3 Floyd算法流程

Fig. 3 Floyd algorithm

划可以有效缓解道路压力和增强电网的承载力。

从交通网角度,为缓解道路压力,期望电动汽车能在每个充电站平均分布。为衡量这一指标,引入方差对数据进行处理。

$$S_{car}^2 = \frac{\sum_i^{N_{st}} (X_{car,i} - \bar{X}_{car,i})^2}{N_{st} - 1}, \quad (18)$$

式中: S_{car}^2 为计算出的方差; $X_{car,i}$ 为第*i*个充电站中电动汽车的数量; $\bar{X}_{car,i}$ 为需要充电的电动汽车在所有充电站内平均分布时每个充电站的车辆数; N_{st} 为充

电站的总数量。

从电网角度,期望能提供更多的储能容量以供调度,因此引入式(9)、式(10)储能的计算方法,同时认为车辆在充满电后停车时间越久,所提供的储能可供调度的时间就越久。

由于所得的各项数据指标数量级不相同,但认为其在充电站的选址定容研究中重要性是相同的,为使数据具有可比性,将所有指标归一化处理,将数据等比缩小或放大至0~1的区间内,方便进一步计算。根据电动汽车V2G储能潜力、停车时长、电动汽车在充电站内平均分布3个指标,结合式(9)、式(10)、式(4)、式(18),目标函数为

$$\max \left\{ \begin{aligned} & \left| E_{\text{total, ch, gy}}(T) \right| + \left| E_{\text{total, dis, gy}}(T) \right| + \\ & \sum_i^{N_{\text{full}}} T_{i, \text{gy}} - S_{\text{car, gy}}^2 \end{aligned} \right\}, \quad (19)$$

式中: $E_{\text{total, ch, gy}}(T)$, $E_{\text{total, dis, gy}}(T)$ 为归一化后充电、放电状态下的电动汽车储能总容量; $T_{i, \text{gy}}$ 表示归一化后第*i*辆电动汽车充满后的停车时间; N_{full} 表示在研究的时间段内可以充满电的电动汽车数量; $S_{\text{car, gy}}^2$ 表示归一化后充电站电动汽车分布的方差。

3 算例分析

3.1 仿真参数设置

3.1.1 电动网约车参数设置

根据文献[18],某市某区电动网约车数量为5 500辆;电动网约车主要使用类型为比亚迪E6,其主要参数:充电功率为45 kW,电池容量为83 kW·h,百千米电耗为20.5 kW·h;由1.1节可知电动汽车的出行时刻、停车时间等行驶参数;由2.1节动态交通网模型,并考虑城市交通网结构的复杂性和电动汽车的行驶特性,本次建模分析过程中将电动汽车的行驶速度定为60 km/h,并认为电动汽车按照最短路径匀速行驶。

3.1.2 交通网结构设置以及道路设置

为验证本文充电站选址定容模型的有效性,选取已进行城市功能区划分的某市辖区交通网拓扑结构如图4所示^[18],该交通网包含29个节点和49条道路,节点即为道路的相交处。各道路的长度、流量、各时段饱和度数据见参考文献[21]。该区域分为居民区1(含节点1—11)、居民区2(含节点12—16)、工作区(含节点17—20)、商业区(含节点21—29)。本文将道路等级分为主干道和次干道,参考文献[21]的试验数据,对于主干道, a, b, γ 分别取值1.726, 3.150和3.000;对于次干道, a, b, γ 分别取值2.076, 2.870和3.000。

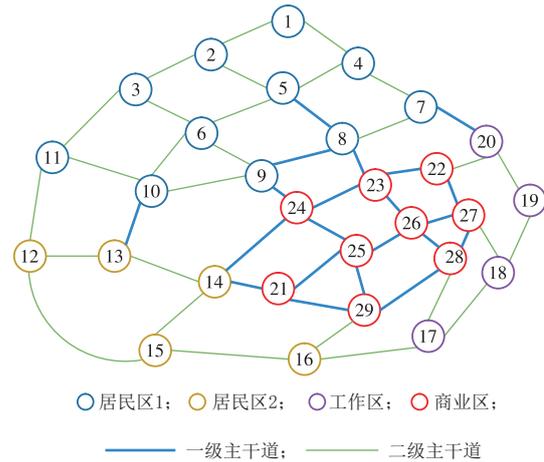


图4 测试区域部分主干道网络示意

Fig. 4 Traffic network in the test urban area

3.1.3 初始出行位置、初始电量与停车时间

不同的功能区作为出行位置的概率不尽相同,一般来说,电动网约车每天的工作分布在全市的各个区域,其分布数据见文献[18],其数据如图5所示。对应函数式(1)中: $\mu_D=3.20, \sigma_D=0.88, 0 < s < 200$ 。

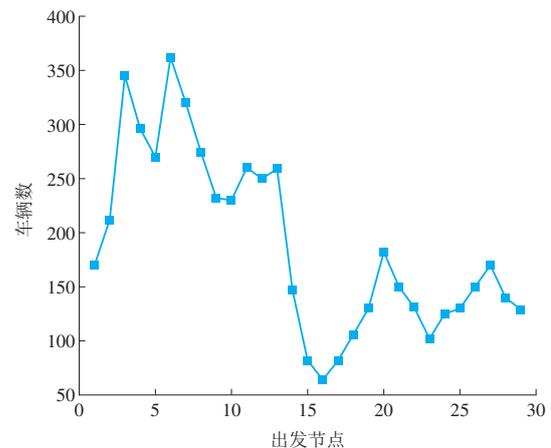


图5 电动汽车初始出行位置分布

Fig. 5 Distribution of electric vehicles' departure locations

电动汽车的初始电量与停车时间均认为服从正态分布,用 t_{park} 表示电动汽车的停车时间, $t_{\text{park}} \sim N(2.0, 0.333^2)$,其服从期望值为2,标准差为0.333的正态分布;用 $S_{\text{OC begin}}$ 表示电动汽车的初始电量, $S_{\text{OC begin}} \sim N(0.8, 0.167^2)$,其服从期望值为0.8,标准差为0.167的正态分布。

3.1.4 研究时间段

本文以夏天为背景,考虑一天中09:00—19:00的储能容量情况。同时认为这10 h段内为负荷高峰时段,因此只考虑电动汽车放电储能容量,忽略电动汽车充电储能容量。

3.1.5 电网与充电站数量设置

本文选用IEEE 14标准节点,根据电网节点数

量,选取 5 个节点作为充电桩进行计算。IEEE 14 标准节点结构如图 6 所示。

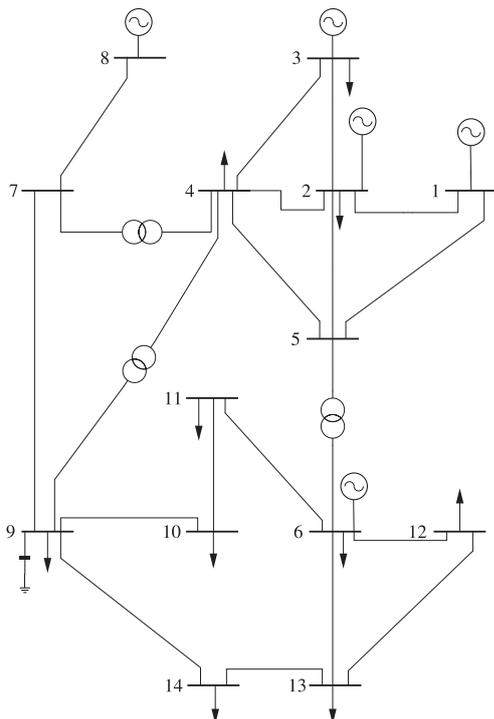


图 6 IEEE 14 标准节点结构

Fig. 6 IEEE 14 standard node structure

3.2 最优充电桩分布

本算例基于 Matlab 平台对算例进行分析与求解。在本次计算中,将 09:00—19:00 分为 4 个时段(09:00—12:00, 12:00—14:00, 14:00—17:00, 17:00—19:00)进行研究,首先求出每个时段的最优充电站分布情况以及 2 个次优情况,然后根据 12 种结果中的充电站分布进行统计与分析。各时段最优充电站选址节点分布情况见表 1。

表 1 各时段最优充电站选址节点分布情况

Table 1 Distribution of optimal charging station sites in various periods

项目	节点编号							其他
	14	20	26	8	25	9	23	
被选中次数	14	13	9	7	7	5	5	<5
占比/%	18.7	17.3	12.0	9.3	9.3	6.7	6.7	<6.7

各时段的最优充电站选址节点统计饼状图如图 7 所示,在所有时间段中,一共有 17 个节点被选为最优节点,占有所有节点的 58.6%。其中,14 号节点被选中 14 次,占比 18.7%;20 号节点被选中 13 次,占比 17.3%,此 2 个节点可以认为是最优的充电站选址位置。26,8,25 号节点分别被选中 9,7,7 次,占比 12.0%,9.3%,9.3%,这 3 个节点可以认为是充电站选址的次优位置。14,20,26,8,25 这 5 个节点被认为是最优节点的次数最多,因此认为这 5 个节

点是最优的选址定容位置。最优充电站分布如图 8 所示。

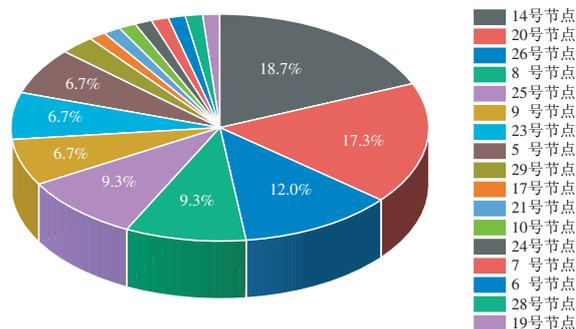


图 7 各时段的最优充电站选址节点统计

Fig. 7 Statistical data of optimal charging station sites in various periods

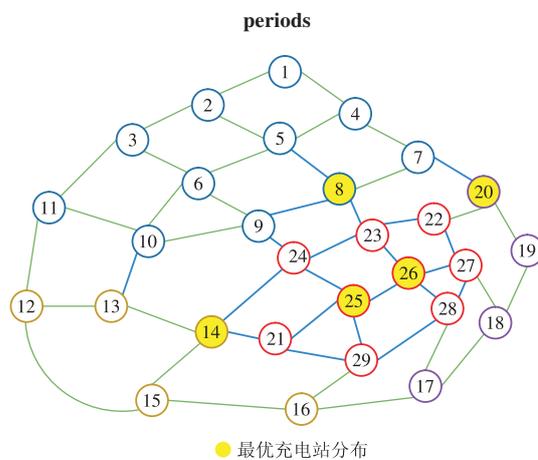


图 8 最优充电站分布

Fig. 8 Distribution of optimal charging station sites

最优的充电站分布中 8,14,20 这 3 个充电站位于商业区与工作区、商业区与居民区的交界点处,25,26 两个充电站位于商业区的中心。这从侧面说明商业区的车辆量大、充电需求频繁,同时也说明商业区与其他区域经常有车辆的交互。其他被选中的节点(如 9,23 等)也多数位于功能区的交界处或者是商业区内部。

为确定充电站的充电桩容量,在确定充电站的具体位置后,重新研究分析这 5 个节点在各个时段的储能容量、可用时间、车辆分布,如图 9—11 所示。

从 3 种数据的分布情况可以看出,充电负荷的高峰时段都出现在 09:00—12:00 与 17:00—19:00 时间段,在 12:00—17:00 时间段内,充电需求会出现一个低谷。预测结果与文献[21]结果一致。其中 8 号节点全时段的车辆充电需求最大,这一节点由 3 条一级主干道以及一条次级主干道相连,连接最大的生活区以及商业区。从图中可以看出,在这一节点处所产生的储能容量与可用时长也最大,是所有充电站中最繁忙的充电站。26 号节点其次,作

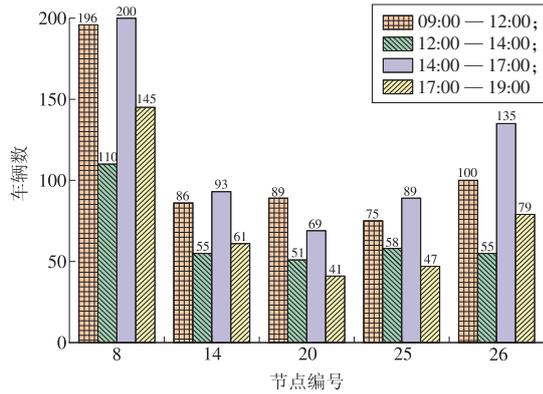


图 9 最优分布下各时段充电车辆分布情况

Fig. 9 Distribution of charging vehicles in various periods under the optimal distribution

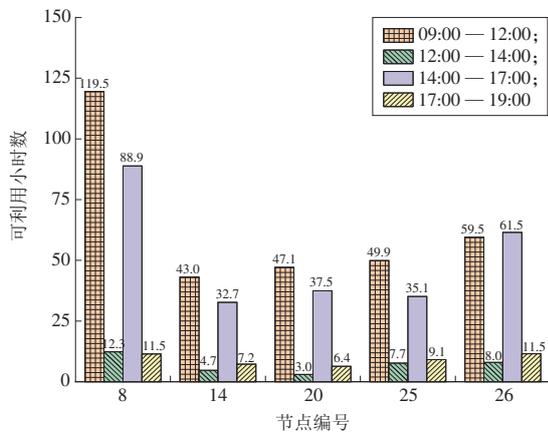


图 10 最优分布下各时段各充电站可用时长

Fig. 10 Available hours at each charging station in various periods under the optimal distribution

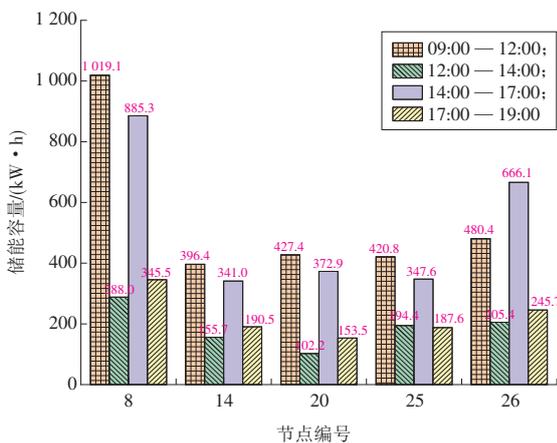


图 11 最优分布下各时段储能容量

Fig. 11 Energy storage capacities in various periods under the optimal distribution

为商业区的中心,其所能提供的储能容量也十分可观。14,20,25号节点的容量与可提供的服务时间近似。从时间角度来看,09:00—12:00这段时间的充电需求最大,17:00—19:00时间段其次。

根据电动汽车的已知数据,每辆电动汽车从0%充电至100%的时间约为2h,而时间段也近似以

2小时进行划分,因此可以认为每个时间段内的充电汽车数量即为该时段所需要的充电桩数量。充电桩的规划以满足所有时段下车辆抵达电站时无须等待可以立即开始充电为目标。因此,充电站中充电桩的设定就以图9中电动汽车在所有时间段中的最大值作为充电桩的安装数量。结合以上分析,给出本次充电站的选址定容的最优结论,见表2。

表 2 最优充电站选址定容情况

Table 2 Optimal charging station location and capacity

项目	最优充电站分布节点编号				
	8	14	20	25	26
每个充电站充电桩数量/个	200	93	89	89	135
最佳情况下储能容量/(kW·h)	14 270.28				
最佳情况下可利用时长/h	888.52				

其中,储能的容量和可利用时长考虑的时间段为09:00—19:00,由于大部分车辆的出行都在这一时间区间之内,可以认为对这一时段的研究代表全天的情况。

4 结束语

本文提出一种考虑储能容量的电网投资的充电站选址定容模型,并以某市主城区的部分交通网和IEEE14节点配电网为例,验证了方法的有效性。结果表明:

(1)充电站的最优位置多数分布在商业区和生活区的交界处,以及商业区的中心。同时在充电站附近一般有2条及以上的一级主干道。说明在生活区和商业区间车辆交往密切,商业区的充电需求较大,充电站分布具有极强的地域特性。在这一区域建立充电站可以有效提高充电站的使用效率。

(2)创新性地将充电站的选址定容对象设定为电网投资的充电站,这种充电站的建设无需考虑建设成本,而需要重点考虑可提供的社会效益。本文研究将为电网建设充电站的位置提供一定的参考。

(3)创新性地将储能容量纳入了充电站的选址定容研究中,所产生的储能容量可以有效降低实际储能建设成本,具有一定的社会效益,对电网也有积极影响。

参考文献:

[1]刘勇,李全优,戴朝华.电动汽车充电负荷时空分布建模研究综述[J].电测与仪表,2022,59(8):1-9.
LIU Yong, LI Quanyou, DAI Chao-hua. Review on the spatio-temporal distribution modeling of electric vehicle charging load [J]. Electrical Measurement & Instrumentation,

- 2022, 59(8): 1-9.
- [2] DU Z L, LIN B Q, GUAN C X. Development path of electric vehicles in China under environmental and energy security constraints [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2019, 143: 17-26.
- [3] 李科, 皇甫霄文, 李梦超, 等. 光-储一体电动汽车充电站储能规划[J/OL]. 电力系统及其自动化学报: 1-12 (2022-12-26) [2023-04-14]. <https://link.cnki.net/doi/10.19635/j.cnki.csu-epsa.001174>.
- LI Ke, HUANGFU Xiaowen, LI Mengchao, et al. Energy storage configuration of integrated PV-storage electric vehicle charging station [J/OL]. Proceedings of the CSU-EPSA: 1-12 (2022-12-26) [2023-04-14]. <https://link.cnki.net/doi/10.19635/j.cnki.csu-epsa.001174>.
- [4] 刘志鹏, 文福拴, 薛禹胜, 等. 电动汽车充电站的最优选址和定容[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(3): 54-59.
- LIU Zhipeng, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. Optimal siting and sizing of electric vehicle charging stations [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36 (3) : 54-59.
- [5] 崔岩, 胡泽春, 段小宇. 考虑充电需求空间灵活性的电动汽车运行优化研究综述[J]. 电网技术, 2022, 46(3): 981-994.
- CUI Yan, HU Zechun, DUAN Xiaoyu. Review on the electric vehicles operation optimization considering the spatial flexibility of electric vehicles charging demands [J]. Power System Technology, 2022, 46(3) : 981-994.
- [6] 刘晓飞, 张千帆, 崔淑梅. 电动汽车 V2G 技术综述[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 121-127.
- LIU Xiaofei, ZHANG Qianfan, CUI Shumei. Review of electric vehicle V2G technology [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 121-127.
- [7] HABIB S, KAMRAN M. A novel vehicle-to-grid technology with constraint analysis—A review [C]//2014 international conference on emerging technologies (ICET). IEEE, 2014: 69-74.
- [8] 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.
- [9] 崔进, 张良力, 刘江, 等. 计及电能质量优化的 V2G 充电桩模糊控制建模[J]. 计算机仿真, 2023, 40(3): 116-121, 245.
- CUI Jin, ZHANG Liangli, LIU Jiang, et al. Modeling for V2G charging pile fuzzy control considering power quality optimization [J]. Computer Simulation, 2023, 40(3): 116-121, 245.
- [10] 黄亮, 刘明, 张锐明. 双向充电桩 V2G 控制策略研究 [J]. 电力电子技术, 2019, 53(8): 41-44, 49.
- HUANG Liang, LIU Ming, ZHANG Ruiming. Research on V2G control strategy of bidirectional [J]. Power Electronics, 2019, 53(8): 41-44, 49.
- [11] 罗卓伟, 胡泽春, 宋永华, 等. 大规模电动汽车充放电优化控制及容量效益分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(10): 19-26.
- LUO Zhuowei, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Coordinated charging and discharging of large-scale plug-in electric vehicles with cost and capacity benefit analysis [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36 (10) : 19-26.
- [12] 韩海英. V2G 参与电网调峰和调频控制策略研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- HAN Haiying. The study on the control strategy of V2G participating peak regulation and frequency regulation of the grid [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [13] 周有为, 高忠江, 钟雨哲, 等. 基于改进向量序优化算法的 V2G 电动汽车充电站规划方法[J]. 智慧电力, 2022, 50(7): 104-110.
- ZHOU Youwei, GAO Zhongjiang, ZHONG Yuzhe, et al. V2G electric vehicle charging station planning method based on improved vector order optimization algorithm [J]. Smart Power, 2022, 50(7): 104-110.
- [14] 吕媛, 何永秀, 王可蕙, 等. 需求响应下的电动汽车充电设施配置模型[J]. 现代电力, 2022, 39(4): 469-479.
- LÜ Yuan, HE Yongxiu, WANG Kehui, et al. Configuration model of electric vehicle charging facilities considering demand response [J]. Modern Electric Power, 2022, 39 (4) : 469-479.
- [15] 李蓓, 赵松, 谢志佳, 等. 电动汽车虚拟储能可用容量建模[J]. 山东大学学报(工学版), 2020, 50(6): 101-111.
- LI Bei, ZHAO Song, XIE Zhijia, et al. Electric vehicle virtual energy storage available capacity modeling [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2020, 50(6): 101-111.
- [16] 赵杨, 刘倩. 网约车冲击下出租车行业转型对策研究: 以北京市为例[J]. 科学决策, 2022(12): 107-136.
- ZHAO Yang, LIU Qian. Taxi industry transformation under the impact of online car hailing: A case study of Beijing [J]. Scientific Decision Making, 2022 (12) : 107-136.
- [17] 俞博. 基于 RFID 电子车牌数据的机动车出行行为研究 [J]. 智能城市, 2021, 7(16): 10-12.
- YU Bo. A Study of motor vehicle travel behaviour based on RFID electronic license plate data [J]. Intelligent City, 2021, 7(16): 10-12.
- [18] 张琳娟, 许长清, 王利利, 等. 基于 OD 矩阵的电动汽车充电负荷时空分布预测[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(20): 82-91.
- ZHANG Linjuan, XU Changqing, WANG Lili, et al. OD

- matrix based spatiotemporal distribution of EV charging load prediction [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(20): 82-91.
- [19] 杨鑫, 张启兆. 如何正确运用正态分布——例谈正态分布中的解题策略[J]. 新世纪智能, 2022(41): 12-14.
YANG Xin, ZHANG Qizhao. How to use the normal distribution correctly—Example of a problem solving strategy in the normal distribution [J]. New Century Intelligence, 2022(41): 12-14.
- [20] 郑远硕, 李峰, 董九玲, 等. “车-路-网”模式下电动汽车充放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.
- [21] 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, 5519.
SHAO Yinchi, 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, 5519.
- [22] 卢立果, 刘立越, 鲁铁定, 等. 一种改进的 Floyd 算法[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2019, 42(1): 78-81.
LU Liguang, LIU Liyue, LU Tieding, et al. A modified floyd algorithm [J]. Journal of East China University of Technology, 2019, 42(1): 78-81.
- [23] 吴海峰. 最短路径算法——Dijkstra 及 Floyd 算法[J]. 中国新通信, 2019, 21(2): 32-33.
WU Haifeng. Shortest path algorithm—Dijkstra and Floyd's algorithm [J]. Internet Communication, 2019, 21(2): 32-33.
- [24] 黄杭. 浅谈 Dijkstra 算法与 Floyd 算法[J]. 中国新通信, 2019, 21(3): 162-163.
HUANG Hang. An introduction to Dijkstra's algorithm and Floyd's algorithm [J]. Internet Security, 2019, 21(3): 162-163.
- [25] 王志峰, 何雅玲, 康重庆, 等. 明确太阳能热发电战略定位促进技术发展[J]. 华电技术, 2021, 43(11): 1-4.
WANG Zhifeng, HE Yaling, KANG Chongqing, et al. Strategic positioning of solar thermal power generation to promote technological progress [J]. Huadian Technology, 2021, 43(11): 1-4.
- [26] 王义, 杨志伟, 吴坡, 等. 计及高比例分布式光伏能源接入的配电网状态估计[J]. 综合智慧能源, 2022, 44(10): 12-18.
WANG Yi, YANG Zhiwei, WU Po, et al. State estimation for the distribution network with high - proportion distributed photovoltaic energy [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(10): 12-18.
- [27] 翁志鹏, 周京华, 李津, 等. 含风光接入的微电网可靠性影响分析[J]. 综合智慧能源, 2023, 45(1): 67-74.
WENG Zhipeng, ZHOU Jinghua, LI Jin, et al. Impact of wind and solar power grid connection on microgrid reliability [J]. Integrated Intelligent Energy, 2023, 45(1): 67-74.

(本文责编:张帆)

收稿日期:2023-05-12;修回日期:2023-08-01
上网日期:2023-08-16;附录网址:www.iienergy.cn

作者简介:

孙雨乐(2000),男,硕士生,从事电力系统优化、储能技术等方面的研究,sunyl200011@163.com;

漆淘懿(1998),男,博士生,从事需求响应、储能技术等方面的研究,eeqty@zju.edu.cn;

赵宇明(1978),男,高级工程师,博士,从事柔性直流输电技术等方面的研究,zhaoy97@sina.com;

叶承晋*(1987),男,研究员,博士,从事电力系统规划运行等方面的研究,yechenj@zju.edu.cn;

惠红勋(1992),男,博士/博士后,从事电力系统负荷调控、优化运行等方面的研究,hongxunhui@um.edu.mo。

*为通信作者。