

引用格式:董鑫坤,刘永慧.基于主从博弈的考虑无线充电道规划的电网调度策略[J].电力科学与技术学报,2024,39(5):91-101.

Citation: DONG Xinkun, LIU Yonghui. Grid dispatching strategy for wireless charging road planning based on Stackelberg game[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(5): 91-101.

基于主从博弈的考虑无线充电道规划的 电网调度策略

董鑫坤¹, 刘永慧²

(1. 上海电机学院电气学院, 上海 201306; 2. 上海第二工业大学智能制造与控制工程学院, 上海 201209)

摘要: 该文研究无线充电道的规划问题, 并在规划基础上研究电动汽车在无线充电道上充电对电网造成的影响。首先, 基于道路、充电站的分布和交通情况, 建立新型的路网交通模型, 并通过分析各道路的拥堵系数, 提出无线充电道的最优规划; 其次, 以电网运营商为领导者, 以充电行为的变化规律符合改进需求响应函数的电动汽车用户为跟随者, 建立主从博弈模型; 最后, 采用粒子群算法对其进行求解, 得到最优的分时电价和充电策略, 实现电网运营商收益最大与用户充电成本最小。研究结果表明, 该方法解决无线充电道的利用率和收益低的问题, 并为电动汽车通过无线充电道参与电网调度提供了理论依据。

关键词: 无线充电道; 主从博弈; 电网调度; 拥堵系数; 分时电价

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.05.010 **中图分类号:** TM732 **文章编号:** 1673-9140(2024)05-0091-11

Grid dispatching strategy for wireless charging road planning based on Stackelberg game

DONG Xinkun¹, LIU Yonghui²

(1. School of Electrical Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China; 2. School of Intelligent Manufacturing and Control Engineering, Shanghai Polytechnic University, Shanghai 201209, China)

Abstract: This paper investigates the planning of wireless charging lanes and further explores the impact of electric vehicles (EVs) charging on the power grid while using these lanes. Firstly, a novel road network traffic model is established based on the distribution of roads, charging stations, and traffic conditions. By analyzing the congestion coefficients of various roads, an optimal planning for wireless charging lanes is proposed. Subsequently, a Stackelberg game model is formulated, where the grid operator acts as the leader and EV users, whose charging behavior aligns with an improved demand response function, act as followers. Finally, the particle swarm optimization algorithm is employed to solve the model, yielding optimal time-of-use electricity prices and charging strategies that maximize the grid operator's revenue while minimizing the users' charging costs. The research findings indicate that the proposed method addresses the issues of low utilization and profitability of wireless charging lanes and provides a theoretical basis for EVs to participate in grid scheduling through these lanes.

Key words: wireless charging road; Stackelberg game; grid dispatching; congestion coefficient; time-of-use electricity price

近年来,为应对气候、环境变化和能源资源约束等日益严峻的全球问题,中国积极推动能源清洁低碳发展,电动汽车行业也正在快速发展,但充电

设施的建设却相对缓慢,电动汽车的充电与续航问题亟待解决,充电设施的不断更新升级与扩容十分必要。文献[1]提出了一种考虑投资成本和用户时

收稿日期:2023-10-02;修回日期:2024-04-17

基金项目:国家自然科学基金(61803253)

通信作者:刘永慧(1986—),女,博士,副教授,主要从事电力系统智能控制和切换系统等方面的研究;E-mail:liuyh@sdju.edu.cn

间成本的双层扩容规划方法,对特定城市区域进行充电站扩容,但这种扩容不能对行驶状态的汽车进行充电,且会占用越来越多的城市空间。

目前,充电设施的扩容开始向无线充电技术拓展,在现有充电站的基础上对WCL(wireless charging lane,无线充电道)进行规划越来越必要。WCL的铺设要考虑很多交通因素^[2-8]。文献[9]考虑了公共汽车的行车特性,研究了将静态与动态无线充电结合的充电设施规划方法,先以布设成本最小和站点利用率最大为优化目标,得到静态无线充电的规划结果;再考虑公共汽车的发车频率、行车路程和能耗,最后,以铺设成本最优为目标函数得到WCL铺设规划。但该规划方法只考虑了行车路线固定的公共汽车,而实际道路上更多的是路线不固定的私家车,私家车充电产生的负荷难以估计。针对该问题,文献[10]考虑了电动汽车在红绿灯路口的等待时间,利用该时间段形成的车辆排队长度评估区域车辆的充电需求,求解WCL最优规划。电动汽车的充电需求与道路的拥堵系数的联系也越来越紧密,识别城市中车流量和拥堵适中的关键路段十分关键,它是合理规划WCL的重要参考。

电动汽车的入网和大规模充电必然会对电网的网损和节点电压造成影响^[11-17]。而电动汽车相当于可移动的蓄电池,如果将其服务于电网,不仅可以减少电网负荷压力、保持电网运行稳定,还可以起到削峰填谷的作用^[18-24]。文献[25]提出了“车一路一网”交互的电动汽车充电调度策略,以预测电动汽车充电的时空特性为基础,依据电动汽车电价响应模型,建立主从博弈关系,对电网和用户的收益进行多目标优化,实现充电负荷的均匀分布。但在WCL上,电动汽车充电更频繁,对电网产生的影响也更大,针对此类问题还有待进一步研究。

目前,将拥堵系数作为规划指标的研究鲜见,在无线充电道上对用户充电行为进行引导的研究也有限。因此,本文研究了基于城市道路特性、交通因素和充电设施因素下WCL的规划问题,并分析了在此规划策略下的运营收益。首先,建立了含道路和交通因素的新型路网交通模型,对每条道路的充电需求进行估计,确定WCL的规划位置和长度;其次,以电网运营商为领导者,以电动汽车用户为跟随者,建立主从博弈模型,使电网运营商和电动汽车用户双方的利益最大化;最后,通过建立电网运营商和电动汽车用户的博弈模型,

得到最优的分时电价、电网调度策略和电动汽车充电策略。

1 无线充电道规划模型

无线充电道可看作在一定范围内可随车辆移动的充电站,对无线充电道的铺设会影响电动汽车用户的充电行为,进而波及整个充电系统对电网的影响。因此,对无线充电道的规划需综合考虑城市道路、铺设区域内的充电站分布与城市道路的拥堵等情况。

1.1 路网参数定义

本文路网中的参数可分为道路参数、充电设施参数和电动汽车参数3部分,具体见表1。

表1 路网道路参数

Table 1 Road-network parameters

参数名称	参数符号	参数单位
道路数量	m	条
车道数	n	个
车道宽度	w	m
限速	V_d	km/h
道路长度	L	m
拥堵系数	C	—

在表1中,拥堵系数 C 的计算需要考虑不同时段的车流量造成的影响。

为了使车流量的统计结果更加准确,本文分别考虑城市里早、中、晚3个阶段的车流量,每个阶段挑取2个时段进行检测。本文检测的6个时段分别为08:00—09:00、10:00—11:00;12:00—13:00、14:00—15:00;17:00—18:00、20:00—21:00。

在计算拥堵系数 C 时,需采集5 min以内的在车道上行驶过的车辆数与这些车辆的平均速度。本文选取这些时段里随机的5 min进行采集,采集数据和常量见表2。在表2中, $T=5$ min, $S=10$ m²。

表2 采集数据和常量

Table 2 Sampled data and constants

参数名称	参数符号	参数单位
道路车辆数	Q	辆
道路平均车速	V_a	km/h
采集时长	T	min
单个车辆平均占地面积	S	m ²

第 i 条道路在 t 时段的拥堵系数 $C_{i,t}$ 的计算公式^[26]为

$$C_{i,t} = \frac{Q_{i,t} V_{a,i} S}{TV_{d,i} n \tau \omega} \quad (1)$$

式中, $Q_{i,t}$ 为第 i 条道路在 t 时段的车辆数; $V_{a,i}$ 为第 i 条道路的平均车速; $V_{d,i}$ 为第 i 条道路的限速。

拥堵系数需要考虑 6 个时段的权重 $\alpha_i, i=1, 2, \dots, 6$, 每个时间段权重系数为该时段每隔 5 min 时间段车流总数 $Q_{i,t}$ 与当日 6 个采样时间段的总车流量 $Q_{\text{总}}$ 之比, 即:

$$\alpha_i = \frac{Q_{i,t}}{Q_{\text{总}}} \quad (2)$$

第 i 条道路最终拥堵系数 C_i 的计算方法为各时段的权重和各时段的拥堵系数之和, 其计算公式为

$$C_i = \sum_{t=1}^6 \alpha_i C_{i,t} \quad (3)$$

1.2 充电设施参数定义

本文理论推导与计算均基于现有的 k 个充电站分布规划无线充电道, 其性能参考宇通客车和哈尔滨工业大学无线充电技术团队联合研制的无线充电系统, 其性能和成本参数见表 3、4。

表 3 无线充电道设施参数

Table 3 Charging facility parameters of WCL

充电功率 $P_{\text{char1}}/\text{kW}$	充电效率 $\eta_{\text{ch1}}/\%$	建造成本 $f_p/$ (万元·km ⁻¹)	充电电价 $f_{\text{char1}}/$ (元·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)
80	85	500	1.8
资金	2 500 万元		
安装要求	最短 0.1 km, 最长 0.5 km		

表 4 充电站设施参数

Table 4 Charging facility parameters of charging station

充电功率 $P_{\text{char2}}/\text{kW}$	充电效率 $\eta_{\text{ch2}}/\%$	充电电价 $f_{\text{char2}}/$ (元·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	商业用电成本 $f_c/$ (元·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)
60	85	1.2	0.7

1.3 电动汽车参数定义

假设城市可自由行驶的电动汽车为同一种类型。参考比亚迪 e3, 由电动汽车的性能和电动汽车用户充电习惯得到的电动汽车的参数见表 5。

表 5 电动汽车参数

Table 5 Electric vehicle parameters

电池容量 $P_{\text{EV}}/(\text{kW} \cdot \text{h})$	理论里 程/km	电车交通 占比/%	无线充电道充 电概率 $\sigma_1/\%$	充电桩充电 概率 $\sigma_2/\%$
50	400	40	80	30

1.4 无线充电道规划求解约束条件

1.4.1 最低车流量约束

当检测的道路上行驶的车辆数低于阈值时, 该道路不会建造无线充电道。本文以 5 min 内道路车流量平均值为其阈值。

在计算该阈值时, 无线充电道的电动汽车产生的充电收益与该车道铺设成本须相等, 即

$$Q_{\min} = \frac{f_{5\min}}{\left(\frac{0.1}{\bar{V}} P_{\text{char1}}\right) \cdot (\eta_{\text{ch1}} f_{\text{char1}} - f_c) \times 40\%} \quad (4)$$

式中, Q_{\min} 为道路上车辆数下限; \bar{V} 为路网里所有车辆的平均速度; $f_{5\min}$ 为无线充电道 5 min 内等效建设成本, 其应满足:

$$f_{5\min} = \frac{0.1 f_p}{365 \times 24 \times \frac{60}{5}} \quad (5)$$

即当第 i 条道路的车辆数 Q_i 满足一定的关系式时, 该条道路会考虑铺设无线充电道, 即

$$Q_i = \frac{1}{6} \sum_{t=1}^6 Q_{i,t} > Q_{\min} \quad (6)$$

定义决策变量 $J_1(m)$: 当 $Q_i > Q_{\min}$ 时, $J_1(m) = 1$, 当前道路可考虑铺设 WCL; 否则, 当 $Q_i \leq Q_{\min}$ 时, $J_1(m) = 0$, 当前道路不会铺设 WCL。

1.4.2 充电站服务半径约束

k 个充电站的服务半径均为 d , 计算第 k 个充电站到第 m 条道路的距离 $D(k, m)$, 定义决策变量 $J_2(m)$, 当 $D(k, m) > d$ 时, $J_2(m) = 1$, 当前道路可考虑铺设 WCL; 否则, 当 $D(k, m) \leq d$ 时, $J_2(m) = 0$, 当前道路不会铺设 WCL。

1.4.3 无线充电道总长约束

对于选中的可以铺设 WCL 的第 h 条道路, 用归一化方法计算其拥堵系数 p_h , 该归一化计算式为

$$p_h = \frac{C_h - C_{\min}}{C_{\max} - C_{\min}} \quad (7)$$

式中, C_h 为道路 h 的拥堵系数; C_{\min} 、 C_{\max} 分别为道路拥堵系数最大、最小值。

归一化处理后的拥堵系数 $p_h \in [0, 1]$ 。

设每条被选中道路的铺设长度为 $L_{p,i}$, 考虑单条无线充电道长度的最小值和最大值, 所以有

$$L_{p,i} = \begin{cases} 0, & p_h L_h < 0.1 \text{ 且 } L_h < 0.1 \\ 0.1, & p_h L_h < 0.1 \text{ 且 } L_h > 0.1 \\ 0.5, & p_h L_h > 0.5 \\ p_h L_h, & 0.1 \leq p_h L_h \leq 0.5 \end{cases}$$

式中, L_h 为第 h 条道路的长度。

因此, 得到最终的铺设长度 L_p 为

$$L_p = \sum_{i=1}^h L_{p,i} \quad (8)$$

在本文中,假设总铺设的WCL的道路长度不得超过5 km,即

$$L_p \leq 5 \quad (9)$$

1.5 WCL规划目标函数

1.5.1 WCL的年收益

单条WCL道路的充电收益为日均电动汽车流量与单辆电动汽车充电费用乘积,故无线充电道的年收益 F_1 为每条WCL道路的年收益之和,即

$$F_1 = 365 \sum_{i=1}^h 0.4 \sigma_1 Q_i \frac{L_{p,i}}{V_{a,i}} P_{\text{char1}} \eta_{\text{ch1}} f_{\text{char1}} \quad (10)$$

式中, Q_i 为第*i*条道路的车辆数。

1.5.2 已有的充电站的年收益

假设充电站服务范围内的道路有*f*条,单个充电站的充电收益为日均电动汽车流量与单辆电动汽车充电费用乘积,则所有充电站的年收益 F_2 为

$$F_2 = 365 \sum_{i=1}^f 0.4 \sigma_2 Q_i P_{\text{char2}} \eta_{\text{ch2}} f_{\text{char2}} \quad (11)$$

1.5.3 无线充电道的年运营成本

该成本 F_3 为所有WCL道路售出电量与商业用电成本的乘积,即

$$F_3 = 365 \sum_{i=1}^h 0.4 \sigma_1 Q_i \frac{L_{p,i}}{V_{a,i}} P_{\text{char1}} f_c \quad (12)$$

1.5.4 铺设成本

该成本 F_4 为总铺设WCL道路长度与每千米WCL建造成本的乘积,即

$$F_4 = f_p \sum_{i=1}^h L_{p,i} \quad (13)$$

因此,要最大化年利润 F ,也就是最大化年收益和运营铺设成本之差,即

$$\max F = \max (F_1 + F_2 - F_3 - F_4) \quad (14)$$

2 电网运营商和电动汽车模型

本文以电网运营商为领导者,制定分时电价,控制新能源出力,使电网运营商收益最大。在该模型中,以电动汽车用户为跟随者,决定自身充电行为,使电动汽车充电成本最小,最终,通过博弈得到最优的分时电价和电动汽车充电策略。

2.1 含WCL的电力运营系统结构

含WCL的电力运营系统由大电网、运营商、微电网和负荷构成,其结构如图1所示。

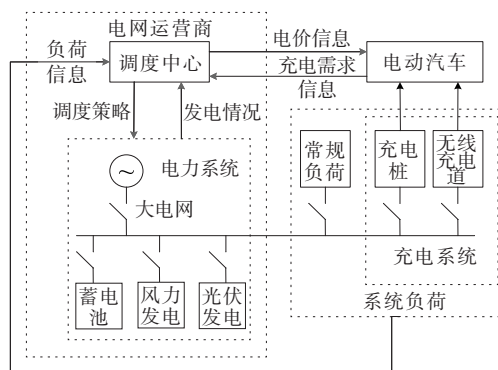


图1 电力运营系统结构图

Figure 1 Structure of power operation system

系统中各种参数的定义见表6。

表6 系统参数

Table 6 System parameters

对象	参数	含义	单位
大电网	P_g	大电网出力	kW
	P_{gs}	大电网售电量	kW
	P_{gb}	大电网买电量	kW
微电网	P_w	风力发电出力	kW
	P_{pv}	光伏发电出力	kW
运营商	P_b	蓄电池出力	kW
	f_{so1s}	常规负荷售电价	元/(kW·h)
	f_{so2s}	充电站售电价	元/(kW·h)
负荷	f_{so3s}	无线充电道售电价	元/(kW·h)
	l_c	常规负荷	kW
	l_{ch1}	充电站负荷	kW
	l_{ch2}	无线充电道负荷	kW

2.2 主从博弈模型

在本文的主从博弈模型中,电网运营商处于主导地位,是领导者,可先选择定价策略。电动汽车属于跟随者,根据电网运营商的定价策略决定是否充电。

在主从博弈过程中,电网运营商的决策目的是最大化自己收益,而电动汽车的决策目的则是最小化自身充电成本。

在主从博弈中,电网运营商会先根据以往的电价、自身发电情况和区域用电量制定一个电价;然后,电网运营者得出电动汽车在当前电价上的充电情况和自身收益,得到电动汽车的充电成本;最后,电网运营商再根据得到的反馈调整电价,反复博弈,得到该主从博弈的平衡点。

2.3 电网各单元出力约束条件

2.3.1 风光出力约束

风光发电的实际出力不能超过其预测出力的大小,需满足约束条件:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{w,i} \leq P_{wpre,i} \\ 0 \leq P_{pv,i} \leq P_{pvpre,i} \end{cases} \quad (15)$$

式中, $P_{w,i}$ 为风力发电在 i 时刻的发电功率; $P_{wpre,i}$ 为风力发电在 i 时刻的发电功率预测值; $P_{pv,i}$ 为光伏发电在 i 时刻的发电功率; $P_{pvpre,i}$ 为光伏发电在 i 时刻的发电功率预测值。

2.3.2 大电网功率交换约束

大电网中进行的功率交换应满足以下约束:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{g,i} \leq P_{g,i}^{\max} \\ 0 \leq P_{gs,i} \leq P_{gs,i}^{\max} \\ 0 \leq P_{gb,i} \leq P_{gb,i}^{\max} \end{cases} \quad (16)$$

式中, $P_{g,i}$ 为大电网在 i 时刻的发电功率; $P_{g,i}^{\max}$ 为大电网在 i 时刻的最大发电功率; $P_{gs,i}$ 为大电网在 i 时刻的售电量; $P_{gb,i}$ 为大电网在 i 时刻的买电量; $P_{gs,i}$ 和 $P_{gb,i}$ 都不能超过电网的最大发电功率值 $P_{g,i}^{\max}$, 且大电网不能在同一时刻处于售电和买电的状态。

2.3.3 蓄电池约束

电网中的蓄电池应满足以下约束:

$$\begin{cases} P_{b,i}^{\min} \leq P_{b,i} \leq P_{b,i}^{\max} \\ 0 \leq P_{beh,i} \leq P_{b,i}^{\max} \\ 0 \leq P_{bdis,i} \leq P_{b,i}^{\max} \\ 0.1 \leq x_{SOC,b,i} \leq 0.9 \end{cases} \quad (17)$$

式中, $P_{b,i}$ 为蓄电池在 i 时刻的充放电功率; $P_{b,i}^{\min}$ 为蓄电池在 i 时刻的充放电功率下限; $P_{b,i}^{\max}$ 为蓄电池在 i 时刻的充放电功率上限; $P_{beh,i}$ 为蓄电池在 i 时刻的充电功率; $P_{bdis,i}$ 为蓄电池在 i 时刻的放电功率; $x_{SOC,b,i}$ 为蓄电池在 i 时刻的荷电状态, 其保持在 0.1 至 0.9 间。 $P_{beh,i}$ 和 $P_{bdis,i}$ 都不能超过蓄电池的最大出力值, 且蓄电池不能在一个时刻同时处于充电和放电的状态。

2.3.4 功率平衡约束

电网的功率平衡应满足以下关系式:

$$P_{gs,i} - P_{gb,i} + P_{w,i} + P_{pv,i} + P_{beh,i} + P_{bdis,i} = l_{c,i} + l_{ch1,i} + l_{ch2,i} \quad (18)$$

式中, $l_{c,i}$ 为区域中在 i 时刻的常规负荷量; $l_{ch1,i}$ 为区域中在 i 时刻充电站产生的负荷量; $l_{ch2,i}$ 为区域中在 i 时刻无线充电道产生的负荷量。

2.4 接入充电设施的电动汽车约束条件

本文电动汽车的状态分为接入充电设施状态

和离线状态两类。接入充电设施的电动汽车分为无线充电道充电、充电站充电两种。离线状态的电动汽车分为行驶耗电和静置待机两种。本文只考虑接入充电设施状态的电动汽车。

电动汽车的充电功率 $P_{v,i}$ 取决于充电设施的充、放电功率, 而且充电功率在不同状态下为不同的恒定值。当电动汽车充电时其为正数, 静置时其值为 0。

$$\begin{cases} E_V^{\min} \leq E_{V,i} \leq E_V^{\max} \\ E_{V,i+1} = E_{V,i} + \Delta h P_{v,i} \\ x_{SOC,v,i} = E_{V,i} / E_{Vcap} \\ 0.1 \leq x_{SOC,v,i} \leq 0.9 \end{cases} \quad (19)$$

式中, $E_{V,i}$ 为电动汽车在 i 时刻的电池电量; E_{Vcap} 为电动汽车电池容量; E_V^{\min} 和 E_V^{\max} 分别为电动汽车电池最低电量和最高电量; $\Delta h P_{v,i}$ 为单个电动汽车在上个时刻的充耗电量, Δh 取 1。

2.5 电动汽车充电产生的负荷计算

整个有充电设施的区域可划分为 A、B、C、D 共 4 个区域, 分别代表无线充电需求高、中、低需求区域和充电站充电区域。其中, 充电站服务半径覆盖到的道路属于 D 区。对于无线充电的需求评判, 根据车流量和无线充电道铺设长度, 无线充电道的需求系数 δ 满足

$$\delta = \mu_1 Q + \mu_2 L_p \quad (20)$$

式中, μ_1 和 μ_2 分别为车流量和无线充电道铺设长度的权重系数。按照 3:4:3 的比例, 把所有无线充电道划分为 A、B、C 3 个区域。

于是, 得到 A 区域的单个小时的电动汽车流量 Q_A 、平均速度 \bar{V}_A , 进一步得到 A 区域的单小时的电动汽车充电需求 l_A 为

$$l_A = 0.8 Q_A L_A P_{v,i} / \bar{V}_A \quad (21)$$

式中, Q_A 、 L_A 、 \bar{V}_A 分别为 A 区所有无线充电道上的总电动汽车流量、无线充电道的总长度和所有车辆的平均速度; $P_{v,i}$ 为第 i 辆电动车的充电功率。

B 区和 C 区的计算方法也与之类似。因此, 无线充电道在 i 时刻产生的负荷为

$$l_{ch2,i} = (l_A + l_B + l_C) / \eta_{ch2} \quad (22)$$

式中, l_B 、 l_C 分别为 B、C 区的每小时电动汽车充电需求。

充电站 i 时刻产生的负荷 $l_{ch1,i}$ 为

$$l_{ch1,i} = 0.8 Q_{D,i} t_{D,i} P_{v,i} / \eta_{ch1} \quad (23)$$

式中, $Q_{D,i}$ 为 D 区第 i 时刻所有无线道上的总电动汽车流量; $t_{D,i}$ 为 D 区 i 时刻所有在充电站充电车辆的

充电时长总和。

2.6 在 WCL 上的电动汽车对电价的响应

电价的变化会影响电动汽车的充电选择,而且在不同的时期,电动汽车对电价的响应也会有所不同,当电价发生变动时,电动汽车的充电用户的比例变化会随之变动,将电价峰谷比与电动汽车的响应程度建立联系^[27],电价峰谷比满足

$$\beta = (f_{\max} - f_{\min}) / f_0 \quad (24)$$

式中, f_{\max} 、 f_{\min} 分别为 f_{so3s} 中的峰电价、谷电价; f_0 为未实施分时电价时的原始电价。

图2为电动汽车对电价峰谷比下的响应情况。

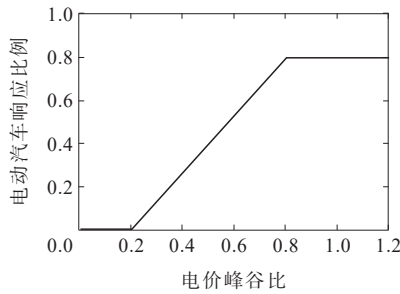


图2 电动汽车对电价响应

Figure 2 Response of EVs to electricity prices

在图2中, λ 为响应峰谷电价的电动汽车数 N_{re} 与电动汽车总数 N 的比值,即

$$\lambda = N_{\text{re}} / N \quad (25)$$

从图2中可看出,当电价峰谷比小于0.2时,没有电动汽车用户对峰谷电价做出响应。当电价峰谷比渐渐升高时,响应的电动汽车逐渐增多,当电价峰谷比升高到足够高时,参与响应的电动汽车数量不再增加。但在实际中,这种变化往往是以渐变的形式反映的。

因此,本文采用改进的需求响应函数来表示电动汽车对电价的响应情况,即 Sigmoid 函数 $S(x)$:

$$S(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (26)$$

式中, x 为电价峰谷比。

为使其精确地反映电动汽车对电价的响应,本文对 Sigmoid 函数系数进行了修改,使电动汽车对电价的响应曲线变得平滑,函数两端也变为趋近状态,同时贴近传统的响应函数。

修改的 Sigmoid 函数为

$$S(x) = \frac{0.8}{1 + e^{-15x + 8}} \quad (27)$$

其函数图像如图3所示。

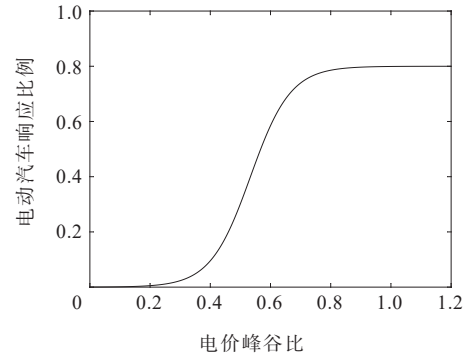


图3 改进的 Sigmoid 函数图像

Figure 3 Figure of improved Sigmoid function

2.7 博弈模型目标函数

1) 上层电网运营商侧的收益。

电网运营商的收益 G_1 来自充电站和无线充电道,且需要减去大电网火力发电产生的成本。

$$\max G_1 = \max \begin{pmatrix} f_{\text{so1s},i} l_{\text{c},i} + f_{\text{so2s},i} l_{\text{ch1},i} + \\ f_{\text{so3s},i} l_{\text{ch2},i} - s_2 P_{\text{gs},i} \end{pmatrix} \quad (28)$$

式中, $f_{\text{so1s},i}$ 为 i 时刻电网运营商规定的常规负荷的售电电价; $f_{\text{so2s},i}$ 为 i 时刻电网运营商规定的充电站的售电电价; $f_{\text{so3s},i}$ 为 i 时刻电网运营商规定的无线充电道的售电电价; s_2 为火力发电每度电的发电成本。

2) 下层电动汽车用户的充电成本。

用户的充电成本 G_2 包括在充电站和无线充电道上充电的充电成本、电动汽车充电产生的电池损耗。

$$\min G_2 = \min \begin{pmatrix} f_{\text{so2s},i} l_{\text{ch1},i} + f_{\text{so3s},i} l_{\text{ch2},i} + \\ s_1 (l_{\text{ch1},i} \eta_{\text{ch1}} + l_{\text{ch2},i} \eta_{\text{ch2}}) \end{pmatrix} \quad (29)$$

式中, s_1 表示电动汽车每度电的电池充电损耗。

3 博弈模型求解

3.1 博弈模型均衡解

本文的主从博弈可表示为

$$G = \left\{ \begin{array}{l} (\text{SUE}); P_{\text{MG}}; \\ l_{\text{ch2}}; f_{\text{so3s}}; G_1; G_2 \end{array} \right\} \quad (30)$$

式中,电网运营商 S 为领导者;电动汽车用户 E 为跟随者; P_{MG} 为一日中电网各个单元的出力策略集合; l_{ch2} 为 1 d 中在 WCL 上的电动汽车响应分时电价后产生的充电负荷集合; f_{so3s} 为电网运营商根据在 WCL 上的电动汽车对电价的响应制定的分时电价集合; G_1 为博弈上层电网运营商侧的收益,其计算方式如式(28)所示; G_2 为博弈下层电动汽车用户的充电成本,其计算方式如式(29)所示。

根据主从博弈解的存在性和唯一性定理^[27]可

知,博弈的解若存在且唯一,主从博弈模型需要满足以下条件:

- 1) 主从博弈的领导者 and 跟随者的目标函数是与主从博弈策略集合相关的非空且连续的函数;
- 2) 跟随者的目标函数是与跟随者自身策略集合相关的连续的凹函数或者凸函数。

本文主从博弈模型的领导者电网运营商 S 的策略集合需要满足式(15)~(18),跟随者电动汽车用户 E 的策略集合需要满足式(17)的第 1 个式子与式(19)。因此,本文 S 和 E 的策略集合都是非空连续的,满足条件 1。

对为博弈下层电动汽车用户 EV 的充电成本目标函数 G_2 求对 l_{ch2} 的二阶偏导得

$$\frac{\partial^2 G_2}{\partial (l_{ch2})^2} = 0 \quad (31)$$

由此可得 EV 的充电成本目标函数 G_2 是关于其策略集合 l_{ch2} 的线性函数,其既是凹函数,也是凸函数,满足条件 2)。

综上所述,本文的主从博弈的解存在且唯一。

3.2 求解流程

博弈上层的电网运营商的目标函数为 1 d 内收益最大,求解结果为 1 d 内电网各单元的出力和分时电价;博弈下层的电动汽车用户的目标函数为充电成本最低,求解结果为各个时刻在 WCL 上充电的电动汽车产生的充电负荷。

主从博弈求解流程如图 4 所示。本文博弈上层采用粒子群算法求解,下层采用 CPLEX 求解器求解,求解步骤如下。

- 1) 电网运营商电价数据、电网各个单元出力初始化,设置粒子群算法粒子规模为 100,迭代次数 r 为 70,初始值 $r=0$,惯性权重为 0.9,其上、下限分别为 0.2 和 1.2,个体和群体学习因子都设为 2,收敛误差设为 0.01;
- 2) 粒子群算法生成 100 组电网运营商电价数据、电网各个单元出力初始数据,并将电价数据传输给在 WCL 上充电的电动汽车用户;
- 3) 迭代次数 $r \rightarrow r+1$;
- 4) 电动汽车用户基于电价,根据需求响应函数决定响应电价的程度,并利用 CPLEX 求解器求解充电成本最低的充电策略,得到新的充电负荷 $l_{ch2,r}$ 和当前充电成本 $G_{2,r}$,最后将新的充电负荷返回至电网运营商;
- 5) 电网运营商根据在 WCL 上充电的电动汽车用户产生的新的充电负荷 $l_{ch2,r}$ 计算收益 $G_{1,r}$;

6) 粒子群算法利用惯性权重和学习因子更新粒子群位置,并重复执行步骤 3)~5),计算上层电网运营商侧的收益 $G_{1,r+1}$ 和下层电动汽车用户的充电成本 $G_{2,r+1}$;

7) 如果 $G_{1,r+1} > G_{1,r}$,则 $G_{1,r+1}$ 和 $G_{2,r+1}$ 成为新的电网运营商收益和电动汽车用户充电成本,否则 G_1 和 G_2 保持第 r 代的值不变;

8) 当 $|G_{1,r+1} - G_{1,r}| \leq 0.01$ 且 $|G_{2,r+1} - G_{2,r}| \leq 0.01$ 时,博弈结束。

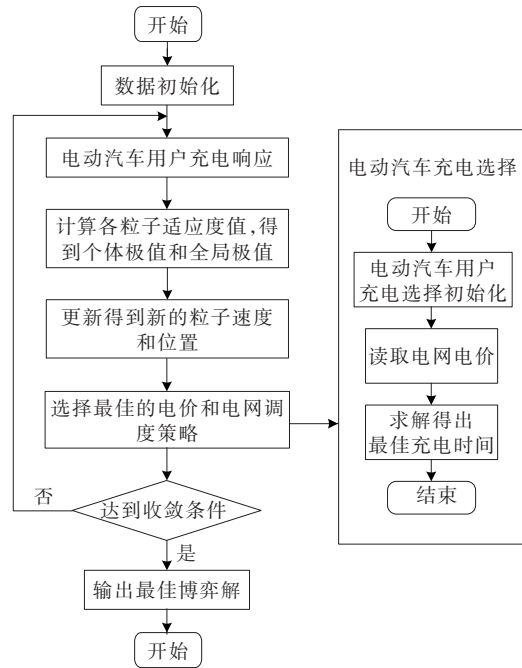


图 4 主从博弈求解流程

Figure 4 Flowchart for solving Stackelberg game

4 算例仿真

4.1 无线充电道规划仿真

本文先利用 SUMO (simulation of urban mobility, 城市交通模拟) 建立了一个含 143 条道路、195 个路口的路网,路网中有 3 个充电站,分别位于路口 J133、J109、J123 处;再利用 Python 与 SUMO 的联合仿真生成随机的车流数据,并将每条道路的车流量信息、平均速度等信息导出进行处理;最后,去除不满足铺设条件的道路,对满足铺设条件的道路利用 MATLAB 进行仿真求解出最优的铺设方案,路网模型和仿真结果如图 5 所示。

在考虑了交通拥堵系数、最低车流量、单条无线充电道铺设长度的约束下,本文得到的仿真结果如图 6 所示。

本文对未考虑交通拥堵系数、充电站位置、单条无线充电道铺设长度的情况也做了仿真对比,其

仿真结果如图7所示。

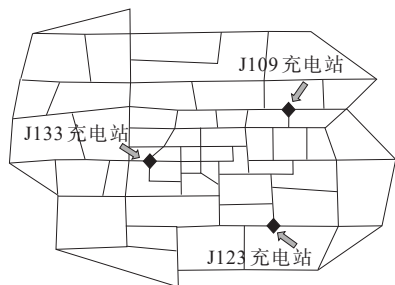


图5 路网模型图

Figure 5 Diagram of road-network model

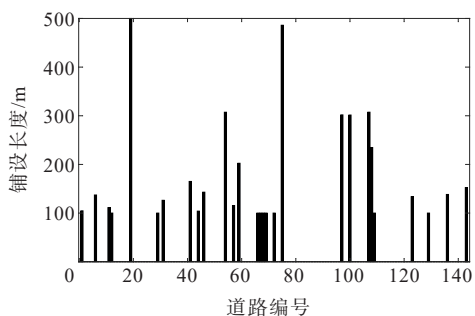


图6 本文规划方法仿真结果图

Figure 6 Simulation results for the proposed planning method

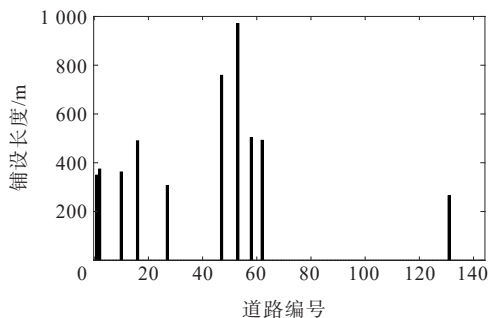


图7 普通规划方法仿真结果图

Figure 7 Simulation results of conventional planning method

这两种方法得到的规划结果对比见表7。

表7 2种规划方法结果对比

Table 7 Comparison of results from two planning methods

方法	铺设路段	铺设成本/万元	年购电成本/万元	年收益/万元	年利润/万元
未优化	1、2、10、16、 27、47、53、 58、62、131	2 435.92	8 084.50	17 670.00	7 149.58
优化	1、6、11、12、19、29、 31、41、44、46、54、 57、59、66、67、68、 69、72、75、97、100、 107、108、109、123、 129、136、143	2 486.10	11 177.00	24 430.00	10 766.90

由表7可知,首先,这两种规划方法所花费的资金非常接近,本文的新型规划方法只比普通规划方法多耗费50.18万元;其次,在新型规划方法下,铺设的道路达到了28条,比普通规划方法多出了18条,使无线充电道能够辐射到更多的城市区域,且也能避免电动汽车都集中在少数的几条道路上充电的情况;最后,新型规划方法下的预测年利润也比普通规划方法的高出了3 617.32万元。因此,本文提出的新型规划方法的规划结果要优于普通的规划方法的。

4.2 分时电价仿真

在得到了规划结果之后,本文对铺设了无线充电道的道路进行了分区,计算无线充电道的需求系数 δ 的两个参数 μ_1 和 μ_2 都取0.5,计算得到无线充电道部分的分区结果见表8。

表8 无线充电道的分区结果

Table 8 Segmentation result of wireless charging road

区域	道路编号
A	75、19、97、100、107、54、59、108
B	6、57、129、46、29、143、11、44、136、109、72、41
C	31、12、68、1、123、66、67、69

根据每个区域的平均车速、车流量和无线充电道的长度预测出总无线充电负荷,并博弈得到分时电价和博弈后的负荷,本文的算例结果如图8所示,电价见表9。

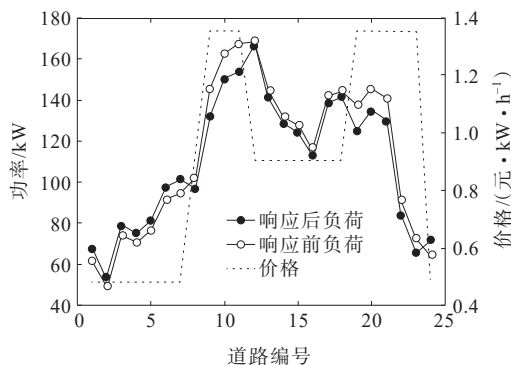


图8 分时电价及其在影响下的负荷变化

Figure 8 Time-of-use electricity price and its impact on load changes

由图8和表9可以看出,在分时电价的影响下,在08:00—11:00和19:00—23:00这2个时段,随着电动汽车充电高峰期的到来,无线充电电价升高到1.35元/(kW·h),对比固定电价时,电动汽车带来的充电负荷都有所降低,在00:00—07:00时段,即用电低谷期,无线充电电价降低到0.48元/(kW·h),

表 9 分时电价结果

Table 9 Time-of-use electricity prices 元

时刻	电价	时刻	电价	时刻	电价	时刻	电价
01:00	0.48	07:00	0.48	13:00	0.90	19:00	1.35
02:00	0.48	08:00	0.90	14:00	0.90	20:00	1.35
03:00	0.48	09:00	1.35	15:00	0.90	21:00	1.35
04:00	0.48	10:00	1.35	16:00	0.90	22:00	1.35
05:00	0.48	11:00	1.35	17:00	0.90	23:00	1.35
06:00	0.48	12:00	0.90	18:00	0.90	24:00	0.48

选择在此时段充电的电动汽车用户比固定电价的情况多,说明本文的规划方法和博弈方法对电动汽车充电行为有积极的影响,能实现削峰填谷的效果。

在分时电价影响的无线充电道负荷变化下,为计算微电网各部分出力、对电网收益的影响,本文将算例加入了一个微电网系统中,微电网中包含一组风力、光伏机组和蓄电池,其仿真结果分别如图 9、10 所示。

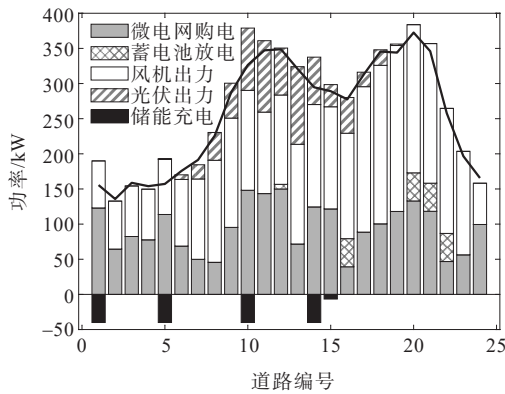


图 9 电网调度策略(无线充电负荷变化前)

Figure 9 Diagram of grid dispatching strategy (before wireless charging load changes)

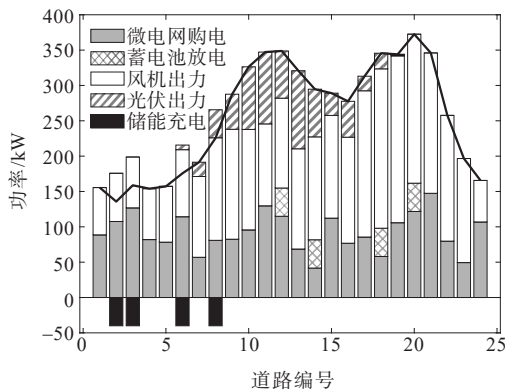


图 10 电网调度策略(无线充电负荷变化后)

Figure 10 Diagram of grid dispatching strategy (after wireless charging load changes)

根据图 9、10 的仿真结果,本文对仿真结果的数据总结见表 10。

表 10 无线充电负荷变化前后数据对比

Table 10 Data comparison before and after wireless charging load changes

火力发电量/kW		电网收益/元	
负荷变化前	负荷变化后	负荷变化前	负荷变化后
2 160.53		3 414.24	
2 033.73		4 104.86	

从图 9、10 中可以看出,在分时电价对无线充电负荷起到的作用下,蓄电池选择在负荷低谷期充电,而非在用电高峰期充电储能(图 9)。由表 10 可知,在本文的规划下,首先,微电网从电网的买电量有所减少,这节省了火力发电的成本,提升了清洁能源的利用率,且减轻了火力发电对环境造成的影响;其次,在分时电价的影响下,电动汽车在电价低谷期响应增多,增加了低谷期的充电需求,电网每日的收益也随之升高。

5 结语

本文建立的新型路网模型同时考虑了城市道路参数、交通参数和充电站服务范围,提出了新型最优规划方法,对无线充电道的铺设长度和位置也加入了新的约束条件,节省了铺设成本,在更低的铺设成本下使 WCL 覆盖了城市更多的区域,有效地提高无线充电道的利用效率,增加了电网运营商的充电收益。且加入的电价与电动汽车充电博弈也有效平衡了电网运营商和电动汽车用户的利益,对电网负荷的削峰填谷也有一定的改善作用。

参考文献:

[1] 李恒杰,夏宇轩,余苏敏,等.基于用户侧主动充电引导的城市电动汽车充电站扩容规划研究[J].中国电机工程学报,2023,43(14):5342-5358.
LI Hengjie, XIA Yuxuan, YU Sumin, et al. Research on capacity expansion and planning for urban electric vehicle charging station based on user-side active charging guidance[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43 (14):5342-5358.

[2] 尚龙龙,程俊杰,王伟,等.计及交通拥堵的电动汽车充电站规划方法[J].电力科学与技术学报,2023,38(1):66-76.
SHANG Longlong, CHENG Junjie, WANG Wei, et al. An electric vehicle charging station planning method

- considering traffic congestion[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2023,38(1):66-76.
- [3] 王呈轩,樊艳芳,李弘昌,等. 直流微网供电的电动汽车无线充电站控制策略[J]. 电网与清洁能源,2022,38(10):126-134.
WANG Chengxuan, FAN Yanfang, LI Hongchang, et al. Research on the control strategy of electric vehicle wireless charging station powered by DC microgrid[J]. Power System and Clean Energy,2022,38(10):126-134.
- [4] 王付胜,郭娟娟,王文洋,等. 电动汽车无线充电系统实现软开关的参数优化设计方法[J]. 中国电机工程学报,2019,39(增刊1):258-267.
WANG Fusheng, GUO Juanjuan, WANG Wenyang, et al. Parameter optimization design method of soft-switching in wireless charging system of electric vehicle[J]. Proceedings of the CSEE,2019,39(Sup 1):258-267.
- [5] 张怡,郝思鹏. 电动汽车充电站变压器容量及储能优化配置[J]. 电测与仪表,2023,60(7):19-25.
ZHANG Yi, HAO Sipeng. Optimized configuration of transformer capacity and energy storage for electric vehicle charging stations[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2023,60(7):19-25.
- [6] 刘辉,谢良峰,谢海敏,等. 考虑电动汽车响应 AGC 的系统网损评估[J]. 电力建设,2020,41(6):52-59.
LIU Hui, XIE Liangfeng, XIE Haimin, et al. Network loss evaluation of power systems considering participation of electric vehicles in AGC[J]. Electric Power Construction, 2020,41(6):52-59.
- [7] 房宇轩,胡俊杰,马文帅. 计及用户意愿的电动汽车聚合商主从博弈优化调度策略[J]. 电工技术学报,2024,39(16):5091-5103.
FANG Yuxuan, HU Junjie, MA Wenshuai. Optimal dispatch strategy for electric vehicle aggregators based on Stackelberg game theory considering user intention [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2024, 39(16):5091-5103.
- [8] 蔡国伟,姜雨晴,黄南天,等. 电力需求响应机制下基于多主体双层博弈的规模化电动汽车充放电优化调度[J]. 中国电机工程学报,2023,43(1):85-99.
CAI Guowei, JIANG Yuqing, HUANG Nantian, et al. Large-scale electric vehicles charging and discharging optimization scheduling based on multi-agent two-level game under electricity demand response mechanism[J]. Proceedings of the CSEE,2023,43(1):85-99.
- [9] 郝明杰. 公交专用道条件下电动公交线路无线充电设施布设方法[D]. 长春:吉林大学,2022.
HAO Mingjie. Layout method of wireless charging facilities for electric bus lines under bus lane conditions [D]. Changchun:Jilin University,2022.
- [10] WANG T, YANG B, CHEN C L, et al. Wireless charging lane deployment in urban areas considering traffic light and regional energy supply-demand balance[C]//2019 IEEE 89th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Spring). Kuala Lumpur, Malaysia. IEEE,2019:1-5.
- [11] 裴振坤,王学梅,康龙云. 电动汽车参与电网辅助服务的控制策略综述[J]. 电力系统自动化,2023,47(18):17-32.
PEI Zhenkun, WANG Xuemei, KANG Longyun. Review on control strategies for electric vehicles participating in ancillary services of power grid[J]. Automation of Electric Power Systems,2023,47(18):17-32.
- [12] 蔡黎,葛棚丹,代妮娜,等. 电动汽车入网负荷预测及其与电网互动研究进展综述[J]. 智慧电力,2022,50(7):96-103.
CAI Li, GE Pengdan, DAI Nina, et al. Review of research progress on load prediction and grid interaction of electric vehicles[J]. Smart Power,2022,50(7):96-103.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 黄建刚,洪祥,李亚飞,等. 基于峰谷差检测反馈的电动车智能有序充电控制系统研究[J]. 自动化与仪器仪表,2023(7):129-133.
HUANG Jiangang, HONG Xiang, LI Yafei, et al. Research on intelligent orderly charging control system of electric vehicle based on peak valley difference detection feedback[J]. Automation & Instrumentation,2023(7):129-133.
- [16] 王天. 无线充电场景下城区电动汽车续航优化[D]. 上海:上海交通大学,2020.
WANG Tian. Optimization of battery life of electric vehicles in urban areas under wireless charging scenario [D]. Shanghai:Shanghai Jiao Tong University,2020.
- [17] 吴忠强,张长兴. 考虑配电网负荷的电动汽车分布式充电控制[J]. 汽车工程,2023,45(4):598-608.
WU Zhongqiang, ZHANG Changxing. Distributed charging control of electric vehicles considering distribution grid load[J]. Automotive Engineering, 2023, 45(4):598-608.
- [18] 于浩明,刘杰,牟欣玮,等. 基于动态服务价的充电站有序充电控制方法[J]. 电力大数据,2023,26(2):1-9.

- YU Haoming, LIU Jie, MU Xinwei, et al. Orderly charging strategy of charging stations based on dynamic time-sharing charging price response[J]. *Power Systems and Big Data*, 2023, 26(2):1-9.
- [19] 张高山, 江御龙, 刘永春. 考虑充电桩最优效率的电动汽车有序充电模型[J]. *自动化与仪器仪表*, 2023(1):64-68.
ZHANG Gaoshan, JIANG Yulong, LIU Yongchun. Orderly charging model for electric vehicles considering optimal efficiency of charging pile[J]. *Automation & Instrumentation*, 2023(1):64-68.
- [20] 陈果, 王秀丽, 原晟淇, 等. 适用于大规模充电场站的深度强化学习有序充电策略[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(2):88-95.
CHEN Guo, WANG Xiuli, YUAN Shengqi, et al. Coordinated charging strategy applicable to large-scale charging stations based on deep reinforcement learning [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(2):88-95.
- [21] 李鹏, 吴迪凡, 李雨薇, 等. 基于综合需求响应和主从博弈的多微网综合能源系统优化调度策略[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(4):1307-1321+1538.
LI Peng, WU Difan, LI Yuwei, et al. Optimal dispatch of multi-microgrids integrated energy system based on integrated demand response and Stackelberg game[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(4):1307-1321+1538.
- [22] 肖丽, 谢尧平, 胡华锋, 等. 基于V2G的电动汽车充放电双层优化调度策略[J]. *高压电器*, 2022, 58(5):164-171.
XIAO Li, XIE Yaoping, HU Huafeng, et al. Two-level optimization scheduling strategy for EV's charging and discharging based on V2G[J]. *High Voltage Apparatus*, 2022, 58(5):164-171.
- [23] 刘丽军, 陈昌, 胡鑫, 等. 基于“车—路—站—网”信息耦合的电动汽车有序充电策略[J]. *高电压技术*, 2024, 50(2):693-703.
- LIU Lijun, CHEN Chang, HU Xin, et al. Ordered charging strategy for electric vehicles based on the information coupling of vehicle-road-station-grid[J]. *High Voltage Engineering*, 2024, 50(2):693-703.
- [24] 王均, 黄柯然, 许潇, 等. 基于阶梯碳价和自适应分时电价的电动汽车有序充电[J]. *电力自动化设备*, 2024, 44(2):64-71.
WANG Jun, HUANG Keran, XU Xiao, et al. Order charging of electric vehicles based on ladder-type carbon price and adaptive time-of-use electricity price [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2024, 44(2):64-71.
- [25] 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.
- [26] 王立夫, 钟昊男, 郭戈. 基于拥堵系数的道路交通网络关键路段辨识[J]. *控制与决策*, 2023, 38(3):843-849.
WANG Lifu, ZHONG Haonan, GUO Ge. Identification of key road sections of road traffic network based on congestion coefficient[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(3):843-849.
- [27] 葛少云, 郭建祚, 刘洪, 等. 计及需求侧响应及区域风光出力的电动汽车有序充电对电网负荷曲线的影响[J]. *电网技术*, 2014, 38(7):1806-1811.
GE Shaoyun, GUO Jianyi, LIU Hong, et al. Demand side response and output of regional wind farm and photovoltaic generation[J]. *Power System Technology*, 2014, 38(7):1806-1811.

(上接第82页 Continued from page 82)

- HE Yangzan, WEN Zengyin. *Electric power system analysis*[M]. 3rd edition. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2002:62-65.
- [18] 邵瑶, 汤涌. 一种快速评估多馈入直流系统换相失败风险的方法[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(12):3429-3436+3670.
SHAO Yao, TANG Yong. A fast assessment method for evaluating commutation failure risk of multi-infeed HVDC systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(12):3429-3436+3670.
- [19] PAI M A. *Energy function analysis for power system stability*[M]. Boston, Springer US, 1989:27-36.
- [20] 马喜平, 何世恩, 姚寅, 等. 计及风速不确定性及相关性的风电场分区虚拟惯量估计[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(10):123-131.
MA Xiping, HE Shien, YAO Yin, et al. Virtual inertia estimation of wind farm zones with wind speed uncertainty and correlation[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(10):123-131.
- [21] ROGERS G. *Power system oscillations*[M]. Boston: Springer US, 2000:85-92.
- [22] MAO X M, ZHU W F, WU L, et al. Optimal allocation of dynamic VAR sources using zoning-based distributed optimization algorithm[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2019, 113:952-962.
- [23] 刘扬, 徐潇源, 马洪艳, 等. 基于谱聚类与功率传输分布因子的电网静态等值[J]. *现代电力*, 2018, 35(3):24-31.
LIU Yang, XU Xiaoyuan, MA Hongyan, et al. Power system static equivalence based on spectral clustering and power transfer distribution factors[J]. *Modern Electric Power*, 2018, 35(3):24-31.