

# 面向边缘智能的匹配充电桩式电动汽车 有序充电方法

王明深, 潘益, 缪惠宇, 韩华春, 曾飞, 袁晓冬

(国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

**摘要:**针对当前充电站电动汽车优化调度中对充电桩资源限制考虑不足、时域离散模型实用性低、削峰能力描述不充分的问题,在考虑车桩匹配的基础上提出了面向边缘智能的电动汽车优化调度和削峰响应能力评估方法。首先,提出面向边缘智能的充电站电动汽车调控架构。其次,运用时域连续变量表征充电时段,构建电动汽车负荷与未来可调配充电桩模型,并引入车桩匹配矩阵及约束条件。以保障用户充电需求为首要目标,结合充电成本降低建立优化调度模型,进而考虑不同削峰响应容量下电动汽车负荷的平移约束,建立削峰响应能力评估模型。最后,以实际充电站典型场景为例进行分析,并与传统未考虑匹配充电桩和时域离散的方法对比,验证所提方法的有效性和实用性。

**关键词:**边缘智能;电动汽车;充电桩;有序充电;匹配关系;削峰响应能力

**中图分类号:**TM732 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed26549

## Edge Intelligence-oriented Method for Orderly Charging of Electric Vehicles with Matched Charging Piles

WANG Mingshen, PAN Yi, MIAO Huiyu, HAN Huachun, ZENG Fei, YUAN Xiaodong

(State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Electric Power Research Institute,  
Nanjing 211103, Jiangsu, China)

**Abstract:** In response to the problems of insufficient consideration of charging pile resource constraints, low practicality of time-domain discrete models, and inadequate description of peak shaving capabilities in the current optimal scheduling of electric vehicles at charging stations, an optimal scheduling and peak shaving response capability evaluation method for electric vehicles oriented to edge intelligence was proposed based on the consideration of vehicle-pile matching. Firstly, an electric vehicle regulation and control architecture for charging stations oriented to edge intelligence was proposed. Secondly, time-domain continuous variables were used to represent the charging period, and a model of electric vehicle load and future available charging piles was constructed, with the introduction of a vehicle-pile matching matrix and constraints. Taking the guarantee of user charging demands as the primary goal and combining with the reduction of charging costs, an optimal scheduling model was established. Then, considering the translation constraints of electric vehicle loads under different peak shaving response capacities, a peak shaving response capability evaluation model was established. Finally, a typical scenario of an actual charging station was analyzed as an example, and the proposed method was compared with the traditional method that does not consider matching charging piles and time-domain discrete models to verify its effectiveness and practicality.

**Key words:** edge intelligence; electric vehicle; charging pile; orderly charging; matching relation; demand response capability

在“双碳”目标和“四个革命、一个合作”能源战略实施背景下,电动汽车的普及将是推动能源和交通领域实现低碳排放的关键方式。根据国

务院办公厅发布的《新能源汽车产业发展规划(2021—2035年)》,我国将加快新能源汽车的推广和应用,以推动可持续发展,未来电动汽车储

**基金项目:**江苏省电力试验研究院有限公司科技项目(DSY202405)

**作者简介:**王明深(1990—),男,博士,高级工程师,主要研究方向为车网互动,Email:wmshtju@163.com

能将具有规模大、高性能、低成本的优势<sup>[1]</sup>,成为电力系统需求侧可控能力的重要来源。

目前国内外对于电动汽车优化调度的研究大多聚焦于场景与控制策略设计方面,从优化电网<sup>[2-5]</sup>或路网<sup>[6-7]</sup>运行、降低车主充电成本<sup>[8-11]</sup>等角度出发进行了丰富的研究,具有前瞻指导意义。但现有研究在建模精细度与实际应用的贴合度上仍可改进。一是模型简化问题,研究多将电动汽车建模为功率连续可调的储能模型,充电功率多直接取为电动汽车功率、仅考虑充电桩整体容量约束<sup>[2-8,10-11]</sup>,而实际生活中电动汽车充电功率及方式须与充电桩匹配,且暂不具备反向放电功能,控制特性并非完全等同于储能。充电桩自身存在功率等充电方式限制,交流桩多为7 kW,直流桩有20~160 kW等多种功率,市售电动汽车支持的充电功率不尽相同,且部分车型不支持直流快充,若不考虑汽车与充电桩的匹配而直接调度,可能造成充电失败,导致调度方案无效。二是优化调度时段划分较为粗糙。同时,研究多将一天等分为数个时段进行离散式调度,将无法充分利用充电桩,增加用户不必要的等待时间。因此,在电动汽车优化调度研究方面尚需进行更贴合实际的精细化建模。

电动汽车因其较高的充电功率和充电灵活性而在电网中具备需求响应潜力,可支持系统调频、削峰填谷等服务<sup>[12-13]</sup>。文献[14]提出一种分布式算法实现电动汽车最优调度。文献[15]基于V2G技术解决微电网断电时的电动汽车需求响应问题。文献[16]计及电池寿命损耗提出了一种电动汽车参与能量-调频市场的协同优化策略。文献[17]通过虚拟电厂技术框架整合分布式移动储能单元,并构建了电动汽车集群参与碳配额交易的协同管理模型。目前对于充电桩电动汽车本身需求响应能力评估的研究尚不充分,仅考虑可响应容量的大小,或仅用一个固定弹性系数反映响应成本,未深入分析调节量和调节成本之间的关系,同时忽略了充电桩对调控能力的限制,所建立的需求响应模型尚不能很好地贴合实际。

基于此,本文在设计面向边缘智能的充电桩电动汽车调控架构的基础上,提出一种考虑车桩匹配的电动汽车优化调度和削峰需求响应能力评估方法。首先,构建基于边缘智能方式的充电桩电动汽车调控架构。其次,针对边缘终端范围

内的充电站,运用时域连续变量对电动汽车充电时间段进行精细化表征,构建电动汽车负荷模型以及未来可调配充电桩模型。进而考虑可调配充电桩的数量、型号,建立车辆-充电桩的匹配矩阵及约束条件。以充分保障用户的充电需求为首要目标,结合降低充电成本搭建电动汽车的优化调度模型。在此优化调度策略下,进一步考虑不同削峰响应容量下的电动汽车负荷平移约束,建立充电站削峰响应能力评估模型,得到响应量和响应成本之间的关系,为充电站参与削峰响应提供理论和数据基础。

## 1 面向边缘智能的充电站电动汽车调控架构

充电站呈分散分布状态,一般采用聚合的方式进行管理。大量数据上传至聚合中心进行处理将给网络通道和中心资源带来巨大压力<sup>[18]</sup>。文献[19]使用边缘智能技术来管理充电电动汽车的数据收集、身份认证。边缘智能技术指通过在网络边缘设备集成智能算法,并在数据生成源近端部署分析模型,实现原始信息的就地处理与决策生成,有效削减了向远程云端传输的原始数据量,在保障分析精度的同时,显著降低了网络负载和终端能耗,形成了时延优化与能效提升的双重优势<sup>[20]</sup>。将边缘智能技术应用于电力物联网,为电动汽车调度架构的设计提供一种有效技术路径。

所设计的调控架构如图1所示,通过将配电网全局划分为多个边缘<sup>[21-22]</sup>,采用边缘终端作为智能决策代理,与所辖范围内的电动汽车与充电桩进行数据交互,实现优化策略求解与调控指令下达等任务。由此能够实现新型配电网中分散电动汽车资源的聚合响应,且边缘计算的方式能够更好地保护数据隐私性,降低集中处理与数据通信的压力。

在实际部署中,边缘智能终端与电动汽车、充电桩之间的通信可能面临网络延迟、数据丢失等问题。这些通信问题将导致车辆状态信息获取不及时、调控指令传输延迟,进而影响电动汽车的实时调度和削峰响应能力。为保障调控架构的可靠运行,本文提出的边缘智能终端架构采用数据本地处理与缓存机制,以减少对实时通信的依赖,提高系统在通信受限环境下的鲁棒性。

以面向边缘智能的充电站电动汽车调控架

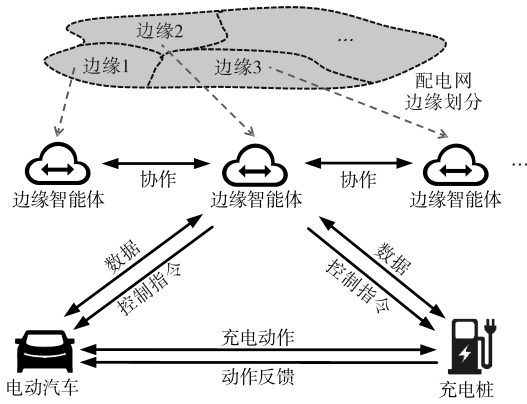


图1 面向边缘智能的充电站电动汽车调控架构

Fig.1 Electric vehicle control architecture for charging station oriented to edge intelligence

构为基础,接下来介绍构建匹配电动汽车的优化调度与充电站削峰响应能力评估方法,作为边缘智能终端中的功能算法。

## 2 充电站电动汽车负荷特性建模和可调配充电桩模型

### 2.1 电动汽车负荷特性建模

电动车辆的负载特性建模需综合考量其储能容量、标称充电功率及转换效率等固有参数,同时需纳入其可接入充电时段和实时充电状态等动态变量。针对充电站内的每辆待服务车辆,采用多维状态向量进行完整表征:

$$\gamma_i = (s_i, E_i, P_{\max,i}, \eta_i, SOC_{S,i}, SOC_{E,i}, SOC_{i,\max}, SOC_{i,\min}, T_{S,i}, T_{E,i}) \quad (1)$$

式中: $i$ 为车辆编号; $\gamma_i$ 为车辆 $i$ 的多维状态向量; $s_i$ 为车辆 $i$ 的二进制充电状态标识(充电中取1,反之取0); $E_i$ 为车辆 $i$ 中动力电池组总容量; $P_{\max,i}$ 为车辆 $i$ 允许的最大充电功率; $\eta_i$ 为车辆 $i$ 的充电效率; $SOC_{S,i}, SOC_{E,i}$ 分别为车辆 $i$ 当前荷电水平与充电终止目标值; $SOC_{i,\max}, SOC_{i,\min}$ 分别为电池荷电状态上、下限; $T_{S,i}, T_{E,i}$ 分别为车辆 $i$ 可充电的起止时刻,支持采用连续时间表达。

基于式(1)可完整描述车辆本体状态,需进一步建立车辆与充电桩的匹配机制以生成实际负载。为避免站内车辆重复调度和无效移动,采用车辆与单个充电桩匹配的原则,此时车辆的有效充电时段可表示为

$$T_{a,i} = [T_{S,i}, T_{E,i}] \cap [T_{cS,j}, T_{cE,j}] \quad (2)$$

式中: $T_{a,i}$ 为车辆 $i$ 与充电桩匹配后的有效充电区间; $j$ 为匹配车辆 $i$ 的充电桩编号; $T_{cS,j}, T_{cE,j}$ 分别为匹配充电桩 $j$ 的可调配起止时刻,支持采用连续

时间表达。

### 2.2 可调配充电桩模型

如式(2)所示,电动汽车的有效充电时段受到充电桩服务时间段的限制,本小节构建可调配充电桩模型。为避免站内车辆重复调度和无效移动,在任意调度时刻 $t_1$ ,若车辆 $i$ 已处于充电状态则有 $s_i=1$ ,表明该电动汽车已经调度,在调度时间节点 $t_1$ 及之后将被归入不可调度负荷的范畴。结合 $t_1$ 时刻前的历史调度方案,可获取未来可调配充电桩集合:

$$\begin{cases} \Gamma_1 = \{p_{11}, p_{12}, \dots, p_{1j}, \dots, p_{1n_1}\} & t_1 \text{时刻} \\ \Gamma_2 = \{p_{21}, p_{22}, \dots, p_{2j}, \dots, p_{2n_2}\} & t_2 \text{时刻} \\ \vdots & \vdots \\ \Gamma_k = \{p_{k1}, p_{k2}, \dots, p_{kj}, \dots, p_{kn_k}\} & t_k \text{时刻} \\ \vdots & \vdots \\ \Gamma_K = \{p_{K1}, p_{K2}, \dots, p_{Kj}, \dots, p_{Kn_K}\} & t_K \text{时刻} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\Gamma_1$ 为当前调度时间节点 $t_1$ 的可调配桩集合; $K$ 为新增可调配桩事件的次数; $\Gamma_k$ 为调度时间节点 $t_k$ 新增可调配桩集合,满足 $\Gamma_k \cap \Gamma_{k-1} = \emptyset, k=2, \dots, K; n_k$ 为调度时间节点 $t_k$ 新增可调配桩的数量; $p_{kj}$ 为调度时间节点 $t_k$ 下新增的第 $j$ 个可调配桩。

当有车辆在调度时间节点 $t_k$ 完成充电任务时,新的可调配充电桩将被释放。通过式(3),可得当前调度时间节点 $t_1$ 之后所有可调配桩集合:

$$\Gamma = \bigcup_{k=1}^K \Gamma_k = \{p_1, p_2, \dots, p_j, \dots, p_{N_c}\} \quad (4)$$

式中: $\Gamma$ 为调度时间节点 $t_1$ 之后所有可调配桩集合; $p_j$ 为编号为 $j$ 的可调配桩; $N_c$ 为调度时间节点 $t_1$ 之后所有可调配桩的总数。

在调度建模中,充电桩资源的时间可用性被离散化为互不重叠的时段。对于充电桩 $j$ ,其不同的可调配时间段在资源集合 $\Gamma$ 中将被视为不同元素,其可调配时段如下:

$$T_{c,j} = [T_{cS,j}, T_{cE,j}] \quad j = 1, 2, \dots, N_c \quad (5)$$

式中: $T_{c,j}$ 为充电桩 $j$ 的可调配时段。

上述分析得到的可调配充电桩情况为优化调度非充电状态的车辆提供了基础。

## 3 匹配充电桩的电动汽车优化调度方法

### 3.1 电动汽车与充电桩匹配模型

充电站的服务能力受站内充电桩数量及类

型配置的制约,在高负荷时段需通过智能调度实现车辆需求与设施资源的优化配置,满足充电需求的同时降低充电成本;在低负荷时段则可执行车辆与充电桩的自动匹配。遵循单车单桩原则(即单辆电动汽车仅可占用一个充电桩),构建 $N_v \times N_c$ 映射矩阵表征车辆-充电桩匹配关系:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1N_c} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2N_c} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N_v 1} & x_{N_v 2} & \cdots & x_{N_v N_c} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: $N_v$ 为待调度的电动汽车数量; $x_{ij}$ 为二元映射变量,取1时表示电动汽车*i*与充电桩*j*建立匹配关系,否则取0。

在充电站高负荷运行状态下,可能出现车辆无法获得匹配的充电资源,导致无法充电。同时遵循单车单桩原则,利用式(6)可确保单个电动汽车最多仅可分配至一个充电桩:

$$\sum_{j=1}^{N_c} x_{ij} \leq 1 \quad i = 1, 2, \dots, N_v \quad (7)$$

在不同时间段内,同一充电桩可为多车辆提供服务,但需满足时间维度上的互斥约束。当充电桩*j*为车辆*i*与车辆*l*充电时,其服务时间段需满足:

$$(t_{S,i} - t_{E,i})(t_{E,l} - t_{S,l}) \geq 0 \quad (8)$$

式中: $t_{S,i}, t_{E,i}$ 分别为车辆*i*的充电起止时刻。

容易验证在式(8)约束下 $(t_{S,i}, t_{E,i})$ 和 $(t_{S,l}, t_{E,l})$ 两个区间不相交。为提高求解效率,该非线性约束可通过大*M*法<sup>[23]</sup>转化为混合整数线性形式:

$$\begin{cases} -y_{ij}M \leq t_{S,i} - t_{E,l} \leq (1 - y_{ij})M \\ -y_{il}M \leq t_{E,i} - t_{S,l} \leq (1 - y_{il})M \end{cases} \quad (9)$$

式中: $y_{ij}$ 为辅助0-1变量;*M*为一足够大的正数常量。

在式(9)中当 $y_{ij}=1$ 时,得到 $(t_{S,i} - t_{E,l}) \leq 0, (t_{E,i} - t_{S,l}) \leq 0$ ,即电动汽车*i*的结束充电时刻早于电动汽车*l*的开始充电时刻;当 $y_{il}=0$ 时,得到 $(t_{S,i} - t_{E,l}) \geq 0, (t_{E,i} - t_{S,l}) \geq 0$ ,即电动汽车*i*的开始充电时刻晚于电动汽车*l*的结束充电时刻。由此表示了使用同一充电桩的两辆电动汽车的充电时刻不交叉约束。因此式(9)所示约束等价于 $(t_{S,i} - t_{E,l})(t_{E,i} - t_{S,l}) \geq 0$ 。

当变量 $x_{ij}$ 和 $x_{il}$ 同时取值为1时,则表明第*i*辆和第*l*辆电动汽车被分配至同一充电桩*j*。在此情形下,时间维度上的非重叠约束需被激活,即

电动汽车*i*的充电时间段 $(t_{S,i}, t_{E,i})$ 和电动汽车*l*的充电时间段 $(t_{S,l}, t_{E,l})$ 必须满足互斥条件。据此对约束方程(9)进行转化,可得:

$$\begin{cases} t_{S,i} - t_{E,l} \geq -(y_{ij} + 2 - x_{ij} - x_{il})M \\ t_{S,i} - t_{E,l} \leq (1 - y_{ij} + 2 - x_{ij} - x_{il})M \\ t_{E,i} - t_{S,l} \geq -(y_{il} + 2 - x_{ij} - x_{il})M \\ t_{E,i} - t_{S,l} \leq (1 - y_{il} + 2 - x_{ij} - x_{il})M \end{cases} \quad i \neq l \quad (10)$$

通过式(7)与式(10)的联合应用,建立车辆-充电桩匹配机制,在此基础上系统构建电动汽车充电的运行约束体系。本研究重点考虑充电功率匹配约束和可用时间匹配约束两类核心条件。

1)电动汽车充电功率匹配约束。电动汽车实际充电功率由匹配充电桩的额定输出能力决定,且不应超过车辆自身的功率耐受上限:

$$\sum_{j=1}^{N_c} x_{ij} P_{\max,i} \geq \sum_{j=1}^{N_c} x_{ij} P_{c,j} \quad i = 1, 2, \dots, N_v \quad (11)$$

式中: $P_{c,j}$ 为充电桩*j*的最大输出功率。

2)电动汽车充电时间匹配约束。电动汽车的充电时间必须严格限定在充电桩可用起止时间段内:

$$t_{S,i} \leq \sum_{j=1}^{N_c} x_{ij} T_{cS,j} \quad i = 1, 2, \dots, N_v \quad (12)$$

$$t_{E,i} \leq \sum_{j=1}^{N_c} x_{ij} T_{cE,j} \quad i = 1, 2, \dots, N_v \quad (13)$$

### 3.2 电动汽车优化调度方法

实际运行中,电动汽车充电功率需与充电桩匹配,且在现有的技术经济条件下通常为额定值。因此,电动汽车优化调度决策的核心在于优化充电时段,此类负荷可视为可平移负荷。设当前调度时刻为 $t_1$ ,优化调度的具体步骤如下:

步骤1:结合调度时刻 $t_1$ 前已生成的电动汽车调度计划,应用2.2节建立的模型确定未来时刻可调配的充电桩。

步骤2:以充分保障用户的充电需求为首要目标,同时兼顾削减充电开支,通过求解优化问题对剩余的待调度电动汽车进行调度。

#### 3.2.1 目标函数

在出行需求刚性约束下,相较于不同时段电价波动,用户更倾向于快速获取与车辆参数匹配的充电桩,缩短等待时长。因此,电动汽车调度采用多目标优化框架,其中优先确保充电需求的满足,其次考虑总成本的降低,并通过加权系数法将多目标模型转化为单目标模型,目标函数

如下式所示:

$$f = \min w_1 \sum_{i=1}^{N_v} r [E_i(SOC_{E,i} - SOC_{S,i}) - \sum_{j=1}^{N_c} x_{ij} P_{c,j}(t_{E,i} - t_{S,i})] + w_2 \sum_{i=1}^{N_v} \int_{t_{S,i}}^{t_{E,i}} (\sum_{j=1}^{N_c} x_{ij} P_{c,j}) c_t dt \quad (14)$$

其中  $c_t = c_{e,t} + c_s$  (15)

式中: $f$ 为综合优化目标函数; $w_1, w_2$ 为权重系数,满足  $w_1 \gg w_2$ ,即通过增大违反第一项子目标的代价来引导优化过程向满足第一项子目标的方向进行,实现最大化满足用户充电需求; $r$ 为斜坡函数,当实际充电量超过用户期望充电量时其值为0,避免子目标1趋于负无穷; $c_t$ 为 $t$ 时刻的电价<sup>[24]</sup>; $c_{e,t}$ 为分时电价; $c_s$ 为充电站充电服务价格。

根据峰谷电价,将式(14)中的成本积分项转化为分段表达式:

$$\int_{t_{S,i}}^{t_{E,i}} (\sum_{j=1}^{N_c} x_{ij} P_{c,j}) c_t dt = (\sum_{j=1}^{N_c} x_{ij} P_{c,j}) \{ c_1(t_{E,i} - t_{S,i}) + [(t_{hE} - t_{hS} - r_1(t_{hE} - t_{E,i}) - r_1(t_{S,i} - t_{hS}))](c_h - c_1) \} \quad (16)$$

其中  $r_1(z) = \begin{cases} 0 & z < 0 \\ z & 0 \leq z \leq t_{E,i} - t_{S,i} \\ t_{E,i} - t_{S,i} & z > t_{E,i} - t_{S,i} \end{cases}$  (17)

式中: $t_{hS}, t_{hE}$ 分别为峰电价的起止时刻; $c_h, c_1$ 分别为峰、谷时段电价; $r_1$ 为限幅斜坡函数; $z$ 为实数范围内的变量参数。

### 3.2.2 约束条件

充电站电动汽车优化调度需满足式(7)、式(10)~式(13)所示电动汽车与充电桩匹配的约束。此外,车辆充电操作必须在用户指定的允许充电时间段内完成,即实际充电时段应完全包含于允许的时间段内:

$$T_{S,i} \leq t_{S,i} \leq t_{E,i} \leq T_{E,i} \quad i = 1, 2, \dots, N_v \quad (18)$$

充电总量应不超过用户预先设定的需求值:

$$\begin{cases} P_{v,i}(t_{E,i} - t_{S,i}) \leq E_i(SOC_{E,i} - SOC_{S,i}) \\ i = 1, 2, \dots, N_v \end{cases} \quad (19)$$

其中  $P_{v,i} = \sum_{j=1}^{N_c} x_{ij} P_{c,j}$  (20)

式中: $P_{v,i}$ 为电动汽车 $i$ 的实际充电功率,由与电动汽车相匹配的对应充电桩功率决定。

充电结束时刻必须晚于开始时刻:

$$0 \leq t_{S,i} \leq t_{E,i} \quad i = 1, 2, \dots, N_v \quad (21)$$

考虑实际网络环境中可能存在的通信延迟,每次在进行调度时,边缘终端应预留一定的时间

缓冲区(推荐为平均通信延迟的2倍),以确保调度指令能够及时到达充电桩和电动汽车。同时,采用状态预测机制,基于历史数据对短期内车辆SOC、入/离站时间等关键参数进行预测,使系统在通信中断情况下仍能维持基本调度功能。

步骤3:每当充电站内增加新的需充电电动汽车时,进行一次调度,依次执行步骤1和步骤2,完成基于车桩匹配关系的优化调度方案更新。

### 3.3 优化调度模型求解

所设计调度方法步骤如3.2节,其中步骤2的优化模型调用EasySolve计算平台<sup>[25]</sup>进行求解,得到电动汽车调度结果并进行分析。

## 4 充电站电动汽车削峰响应能力评估模型

本节以第3节求得的充电站电动汽车优化调度策略为预想运行工况,进一步建立充电站需求响应能力评估模型,考虑充电桩匹配对调控安排的限制,分析响应容量和响应成本之间的关系,为电动汽车参与需求响应提供模型基础。

### 4.1 电动汽车负荷曲线

根据3.2节模型求解得到的各电动汽车充电起始时间和终止时间,可以得到充电站电动汽车的充电负荷曲线如下式所示:

$$P_t = \sum_{i: t_{S,i} \leq t \leq t_{E,i}} P_{v,i} \quad (22)$$

式中: $P_t$ 为充电站在时刻 $t$ 的负荷量。

式(22)在实际程序中可按如下步骤计算:

1)对所有的 $t_{S,i}$ 和 $t_{E,i}$ 从小到大排序,并存入一个数组中,用变量 $m$ 表示数组中元素的顺序编号,并记数组中的元素为 $t_{1,m}$ 。建立一个集合 $\Gamma$ 用于存放需要累加的电动汽车负荷。

2)令 $m=1$ ,此时 $t_{1,m}$ 对应某电动汽车充电起始时刻变量 $t_{S,i}$ ,将该电动汽车负荷 $P_{v,i}$ 加入到集合 $\Gamma$ 中。

3)令 $m=m+1$ ,计算得到充电站时段 $[t_{1,m-1}, t_{1,m})$ 的负荷为

$$P_t = \sum_{P_{v,i} \in \Gamma} P_{v,i}, t_{1,m-1} \leq t < t_{1,m} \quad (23)$$

4)若 $t_{1,m}$ 对应某一表示电动汽车充电起始时刻的变量 $t_{S,i}$ ,则将负荷 $P_{v,i}$ 加入集合 $\Gamma$ 中;否则, $t_{1,m}$ 是对应某一表示电动汽车充电结束时刻的变量 $t_{E,i}$ ,则在集合 $\Gamma$ 中去掉元素 $P_{v,i}$ 。

5)若 $t_{1,m}$ 是数组中的最后一个元素,则负荷曲

线计算完成,否则返回步骤3继续执行计算。

## 4.2 电动汽车削峰响应能力

目前电力系统削峰调峰需求响应通常在一天中负荷高峰时段实施<sup>[26]</sup>,充电站作为负荷侧重要响应资源,需要分析其在给定时段的削峰响应能力。根据车辆-充电桩匹配关系 $X$ ,可得在调度之后各充电桩的可调配时段:

$$\begin{cases} T_{c,j} = [T_{cS,j}, T_{cE,j}] - \bigcup_{i: x_{ij}=1} [t_{S,i}, t_{E,i}] \\ j = 1, 2, \dots, N_c \end{cases} \quad (24)$$

考虑到电动汽车参与削峰响应的方式主要是改变其充电时段,因此在第2节优化模型所得调度结果的基础上,可通过对在削峰响应时段内充电的电动汽车进行调控,从而进行削峰响应。

对削峰响应时段中各电动汽车充电负荷从小到大进行排序,按照削峰响应量逐步增大的顺序依次选择参与削峰响应的电动汽车,对其重新进行调度,目标函数形式与式(14)相同,其中 $N_c$ 表示参与需求响应的电动汽车数量。考虑削峰响应的优化调度除了包含形如式(7)、式(10)~(13)、式(18)~式(21)所示的约束条件,还包含所选择的电动汽车不在削峰响应时段内进行充电的约束,可表示如下:

$$(t_{S,i} - t_{Ed})(t_{E,i} - t_{Sd}) \geq 0 \quad (25)$$

式中: $t_{Sd}, t_{Ed}$ 分别为削峰响应起始和终止时刻。

按照3.1节中类似的方法,将式(25)重构为混合整数线性表达式如下:

$$\begin{cases} -y_i M \leq t_{S,i} - t_{Ed} \leq (1 - y_i) M \\ -y_i M \leq t_{E,i} - t_{Sd} \leq (1 - y_i) M \end{cases} \quad (26)$$

式中: $y_i$ 为辅助0-1变量。

充电站参与削峰响应的决策主要受响应补贴价格与响应成本的影响,其削峰响应能力的评估即是对响应量与响应成本关系的描述。充电站削峰响应的成本由充电电费变化量和对用户充电量减少的补偿两部分构成。借鉴新加坡电力市场的需求响应惩罚机制<sup>[27]</sup>,对于用户减少的充电量,采用电价峰时段的充电价格对用户进行补偿,从而采用下式衡量充电站需求响应成本:

$$C = \sum_{i=1}^{N_c} \left( \int_{t_{S,i}}^{t_{E,i}} P_{v,i} c_{e,t} dt - \int_{t_{S,i}}^{t_{E,i}} P_{v,i} c_{e,t} dt \right) + c_{m,t} \sum_{i=1}^{N_c} [P_{v,i}(t_{o,E,i} - t_{o,S,i}) - P_{v,i}(t_{E,i} - t_{S,i})] \quad (27)$$

式中: $C$ 为充电站削峰响应成本; $c_{m,t}$ 为充电桩在电价峰时段的充电价格; $t_{o,S,i}, t_{o,E,i}$ 分别为削峰响

应前车辆 $i$ 的充电起止时刻。

由于对用户的补偿价格 $c_{m,t}$ 总是高于分时电价,因此在该成本机制下充电站在参与削峰响应时仍将有意愿尽可能满足用户充电需求。

逐步增大削峰响应量,依次求解上述优化问题,并计算对应的充电站响应成本,从而建立充电站削峰响应量和响应成本之间的关系,其中考虑了充电站可调配充电桩对需求响应的限制,能更全面、更贴合实际地评估充电站电动汽车需求响应能力,进一步强化边缘智能终端的应用功能。

需要指出的是,本文参考新加坡电力市场的需求响应惩罚机制,采用电价峰时段的充电价格作为用户补偿标准。该方法具备一定的可行性,能够在模型简洁性与可实施性之间取得平衡。然而,这种补偿机制的适用性会受到不同地区电价差异、季节负荷特性以及用户充电行为偏好等因素的影响。例如,在电价峰谷差较大的地区,峰时段价格补偿具有更强的经济激励效果;而在电价峰谷差较小的地区,这种补偿方式可能难以充分调动用户参与削峰响应的积极性。同样,在夏季用电高峰期,削峰需求更为迫切,电网可能愿意提供更高的补偿价格;而在负荷相对平缓的季节,则可能需要调整补偿策略。

为此,后续研究可引入动态补偿机制设计,根据用户调控代价、负荷特性及市场规则,采用线性补偿、阶梯补偿或基于市场竞价的支付机制;亦可与边缘终端结合,建立基于实时状态感知的差异化补偿策略,以更好适配分布式、多场景的响应执行环境。

## 4.3 预测误差影响与调度鲁棒性分析

在上述优化调度与削峰响应建模中,所采用的车辆充电需求参数(如接入时间、预期充电量)及充电桩可用时段信息,依赖于边缘终端所采集或预测的用户行为与设备状态。由于用户预约时间、实际充电行为及桩释放时刻存在一定不确定性,预测误差将在实际运行中不可避免。

该类误差可能导致调度冲突、充电延迟,进而影响优化模型在削峰响应时段内的精度与响应成本评估准确性。为此,本文建议结合扰动场景分析与滚动优化策略提升调度鲁棒性。一方面,可在离线测试中引入电动汽车接入时间或充电桩释放时刻的扰动,评估其对调度结果(如等待时长、响应代价)的影响程度;另一方面,边缘终端可结合实际接入状态实时更新调度信息,采

用滚动优化机制动态修正剩余车辆的调度决策,从而在保证响应精度的同时,增强模型的实用性。

未来研究可进一步引入基于区间或集合的不确定性描述方法,构建鲁棒优化模型,在多源扰动下提高系统整体调控的稳定性与可行性。

## 5 算例分析

### 5.1 算例设置

算例场景为边缘终端部署于某大型充电站内,包含15个充电桩及150辆待调度的电动汽车,汽车的数量比例及充电时段概率<sup>[28]</sup>如表1所示,初始SOC为0.1~0.3、预期SOC为0.8~0.9之间的随机数,最大允许充电功率为7/20/60/90/120/180 kW中的某项。充电桩的额定功率有7/60/90/120/180 kW这5种类型。调度周期为24 h,参考车主出行及充电负荷规律<sup>[29]</sup>设定为08:00时至次日08:00时。参考上海市发改委《关于进一步完善我市分时电价机制有关事项的通知》,峰时段(08:00—22:00)电价为1.15元/kW·h,谷时段(22:00—08:00)电价为0.35元/kW·h。充电站充电服务费用统一设定为0.8元/kW·h。

表1 电动汽车参数设置

Tab.1 Electric vehicle parameter settings

序号	电池容量/(kW·h)	数量比例/%	充电开始时段	充电概率
1	10	10.67	07:00—10:00	0.22
2	18	10.00	10:00—14:00	0.05
3	24	18.00	14:00—17:30	0.07
4	26	21.33	17:30—20:00	0.52
5	32	5.33	20:00—次日00:00	0.13
6	60	34.67	00:00—07:00	0.01

将传统时域离散的优化调度方法与本文方法进行对比分析,离散调度设置为每隔15 min执行一次调度,其余的参数与连续调度方法相同。考虑到配电网典型日负荷曲线具有在17:00—18:00时负荷增长较快、负荷量较大的特征<sup>[29]</sup>,可能出现供需不平衡的情况,算例分析该时段内充电站电动汽车需求响应能力。

算法采用Rust语言编程实现,优化模型部分调用EasySolve求解。算法部署于所研制的边缘终端设备中,采用半实物仿真方法<sup>[30]</sup>进行测试。

### 5.2 充电站电动汽车优化调度结果

#### 5.2.1 时域连续调度与时域离散调度结果对比

分别进行时域连续调度和时域离散调度,采用匹配充电桩的电动汽车优化调度方法得到的

结果如下,用户充电的等待时长如图2所示,用户充电预期电量需求的未满足情况如图3所示。

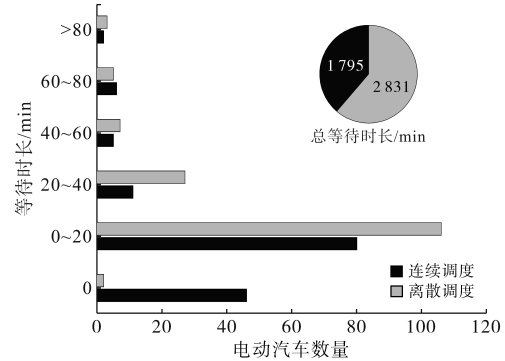


图2 电动汽车等待时长

Fig.2 Electric vehicle waiting time

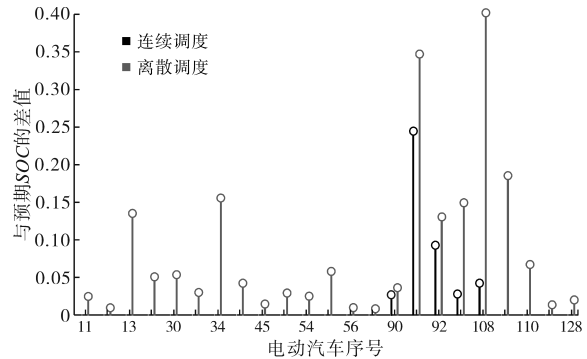


图3 电动汽车充电电量满足情况

Fig.3 The satisfaction of electric vehicle charging

由图2可知,两种调度下用户等待时长的整体趋势一致,这与直观经验相符合,而等待时长的具体值与用户可充时段、充电站参数等相关。个别用户的等待时间明显较一般情况更长,这是由于充电高峰时所能匹配的充电桩资源紧张,少数用户排队时间明显增加。比较两种调度方式可知,连续调度下的用户等待时间普遍短于离散调度下的情况,这主要是因为前者不存在用户可调控起始时刻与设定调度时刻之间的滞留时间,表明本文所提方法能够更及时地响应用户的充电需求,优化用户体验。

图3中柱线的高度反映调度后电动汽车充电需求满足程度的缺口。0代表完全满足,柱线越高表明用户实际充电量与预期充电量的差距越大。从图3中可知,连续调度方式下,有5辆电动汽车存在差值,离散调度方式下,有23辆未能满足充电需求。这得益于连续调度方式能更及时响应用户需求、通过调度安排缩短不必要的等待时间,使充电站整体的充电效率提高,能最大程度地满足用户的充电电量需求。表2为用户充电需求在两种调度方式下的满足程度对比数据。

表2 用户充电需求满足程度对比

Tab.2 Comparison of the satisfaction degree of users' charging needs

调度方式	用户总等待时长/min	用户平均等待时长/min	充电电量满足率/%
连续	1 791	11.94	96.67
离散	2 832	18.88	84.67

由图2、图3和表2可知,在均考虑电动汽车型号与充电桩匹配的基础上,连续调度方法能够更及时、精细地对电动汽车进行调度,使用户等待时间减少约36.7%,充电电量满足率提高约12.0%。充电量未能达到用户期望的情况中,约70%为仅支持慢充的车辆,这类车辆充电功率低、能够匹配的充电桩数目相对更少,故满足充电需求的难度更高。支持快充者,平均所需充电时间约为仅支持慢充者的1/10,能够便捷快速地满足用户出行需求,可见快充是使电动汽车大面积推广的关键技术。

综上,考虑充电桩匹配的时域连续调度更贴近实际应用,能及时、快速响应用户需求,提升充电站整体效率,更大程度地满足用户的充电需求。

5.2.2 未考虑匹配充电桩的调度结果对比

不考虑模型中式(7)、式(10)~式(13)所示电动汽车与充电桩匹配的约束,按照现有方法仅考虑电动汽车总功率小于充电站充电桩总功率约束,得到的调度结果如图4所示。其中,横轴表示电动汽车自身允许的最大充电功率;纵轴表示调度结果中电动汽车对应充电桩的实际功率;深灰点、浅灰点、黑点分别表示实际功率超过、低于、等于电动汽车最大允许充电功率的汽车数量,点的大小表示电动汽车的数量多少。

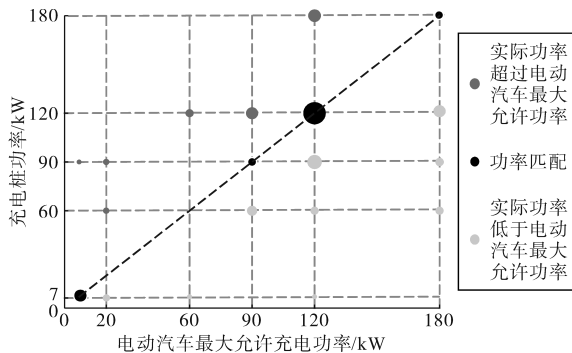


图4 未考虑匹配充电桩的调度结果

Fig.4 The scheduling results of matching charging piles are not considered

此次调度的150辆电动汽车中,有63辆自身功率与充电桩实际功率完全匹配;有37辆电动汽

车所调度的充电桩额定功率超过了自身允许的最大充电功率,这在实际中将导致电动汽车无法从所调度的充电桩处充电,充电失败,调度策略无法执行;其余50辆的充电功率小于自身允许最大充电功率,表明存在功率更匹配的充电桩未被合理调度,该方法在优化用户充电需求满足上仍有提升空间。将传统调度方案与本文提出的基于车桩匹配的优化调度方案进行对比,关键指标对比结果如表3所示。

表3 电动汽车充电功率与充电桩功率匹配情况

Tab.3 Matching of electric vehicle charging power and charging pile power

调度方式	功率匹配率/%	充电桩功率超过电动汽车最大允许功率(充电失败)比例/%	充电桩功率低于电动汽车最大允许功率比例/%
匹配充电桩	86.67	0	13.33
未考虑匹配	42.00	24.67	33.33

表3数据显示,未考虑车桩匹配的传统调度方案存在高达24.67%的充电失败率,其实用性受到显著制约。这一对比结果有力证明了,在电动汽车充电调度中充分考虑车辆与充电桩的匹配关系,对于提升系统可靠性具有关键作用,从而验证了本文所提方法的有效性与必要性。

5.3 充电站电动汽车削峰响应能力分析

根据5.2节的结果,采用第4节算法得到充电站在17:00—18:00时段的需求响应成本和参与响应的车辆数随着削峰响应量的变化如图5所示。

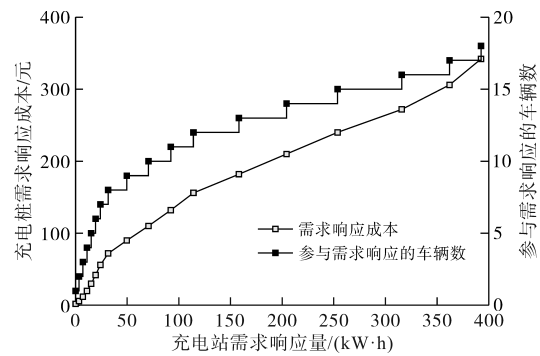


图5 充电站需求响应成本、参与响应的车辆数与需求响应量之间的关系

Fig.5 The relationship between demand response cost, number of vehicles participating in response and demand response quantity of charging station

由图5可知,在一定程度以后,随着响应量增大,参与削峰响应的电动汽车数量逐渐减少,这是由于不同电动汽车参与削峰响应的可提供响

应量差异较大,首先选择响应量低的车辆参与响应,所需的车辆数目较多;再逐渐选择响应量高的车辆参与响应,所需车辆数目较少。削峰响应成本与响应量之间近似呈正比关系,原因在于充电电费、对用户的补偿都以充电量的大小为主要依据。

在此算例参数设置下,充电站在17:00—18:00的最大响应能力为392.6 kW·h,对应的削峰响应成本为348.7元。基于此评估模型,结合实时削峰响应补贴价格、与用户充电协议的规定等市场因素,充电站可对是否参与削峰响应、参与的具体响应量做出判断与决策,有助于充电站经济运行。

#### 5.4 方法扩展性分析与优化措施

本文算例中仅考虑了15个充电桩和150辆电动汽车的场景,在实际大规模应用中,电动汽车与充电桩数量及类型将大幅增加,而本文的方法主要面临如下挑战:

1) 计算复杂度分析。本文所提方法基于混合整数线性规划建模,其中引入的车桩匹配矩阵维度为 $N_v \times N_c$ ,辅助变量 $y_{ij}$ 的维度为 $N_v \times N_c \times N_c$ 。当车辆数 $N_v$ 和充电桩数 $N_c$ 大幅增加时,决策变量数量将呈二次或三次方增长,导致求解时间显著增加。

2) 优化效果影响。大规模场景下,充电类型多样性增加会使车桩匹配更为复杂,特别是在高峰时段,算法可能难以在合理时间内找到全局最优解,导致用户等待时间和充电需求满足率的优化效果下降。

针对上述挑战,本文提出以下优化措施,在不改变基本算法框架的前提下提高大规模场景的适用性:

1) 分层分区调度策略。利用边缘智能架构的特点,将大规模充电站划分为多个子区域,每个子区域由独立的边缘终端负责计算。基于地理位置或充电桩类型进行合理分区,可将规模为 $N_v \times N_c$ 的原问题分解为多个规模约为 $(N_v/k) \times (N_c/k)$ 的子问题,其中 $k$ 为分区数量。这种分层分区策略可以使计算复杂度从 $O(N_v^2 \times N_c)$ 降低至 $O(k \times (N_v/k)^2 \times (N_c/k))$ ,即 $O(N_v^2 \times N_c/k^2)$ ,显著提高计算效率。

2) 启发式预处理机制。在优化求解前引入启发式预处理机制,如基于充电需求紧急度和充电桩匹配度的预筛选,可减少有效决策变量数

量。例如,对于仅支持慢充的车辆,只考虑匹配慢充桩;对于允许快充的车辆,则优先匹配适合的快充桩。这种预处理可将原问题的可行解空间显著缩小,提高求解效率。

3) 分布式并行计算优化。充分利用边缘智能终端的计算资源,采用分布式并行计算方式处理大规模问题。基于车辆分组或时间分段,构建多个并行求解的子问题,通过边缘终端进行协同求解,可有效提高计算效率。

这些措施为本文所提方法在大规模复杂场景中的实际应用提供了技术保障。

## 6 结论

本文提出一种面向边缘智能的考虑匹配充电桩式电动汽车优化调度策略与削峰响应能力评估方法,比较了连续调度和离散调度、考虑匹配与未考虑匹配的电动汽车优化调度策略表现,对充电站削峰响应能力进行了评估,主要总结如下:

1) 提出采用边缘智能终端作为各区域充电站的智能代理,就近采集数据、优化计算、控制决策,实现新型配电网中分散电动汽车资源的聚合响应,并设计部署于边缘智能终端中的电动汽车有序充电方法。

2) 在电动汽车充电调度模型中集成车辆-充电桩匹配机制,通过功率匹配与时间匹配的双重约束,建立精细化电动汽车负荷模型。与传统方法相比,该模型更精准地反映了实际运行需求,显著提升了调度方案的应用价值。

3) 突破传统时域离散框架的限制,引入时域连续变量构建优化模型。该方法使得电动汽车充电过程的调控精度得到提高,有效缩短了用户等待时间,同时优化了充电桩的利用效率。

4) 在充电站削峰响应能力分析中考虑了可用的充电桩对调控的限制,得到响应量和响应成本之间的关系,能够更全面、更贴合实际地评估充电站电动汽车的削峰响应能力。

本文研究假设当前阶段电动汽车主要通过充电桩单向获取电能,未涉及V2G(vehicle-to-grid)双向能量交互模式。然而,随着电动汽车V2G技术的发展,其不仅可作为负荷,也可作为分布式储能资源参与配电网调节,具备更高的灵活性与可调度性。若要支持V2G双向能量交换,未来需在边缘架构、优化调度和响应评估3个方面进行拓展:在边缘终端增加双向功率接口管

理,实时监测电池放电状态和电网需求以确保放电安全与设备保护,并对车桩匹配模型增加桩侧双向功率能力分类,区分具备V2G能力的双向桩与传统单向桩;将电动汽车放电过程视为可调度资源,拓展目标函数,在兼顾用户电费节约的同时叠加放电收益与电网补偿,并对原有充电成本项作相应增补;在削峰响应能力评估中,将“放电补峰”能力并入总响应量计算,并针对双向能量流引入新的平移约束和经济激励机制。同时结合基于车桩匹配的削峰响应评估结果与电力辅助服务市场机制,进一步建立充电站参与削峰响应的调控方法,以及开发适应多元化市场环境的灵活补偿机制,作为配电网边缘智能终端的高级功能模块,是本文后续研究方向。

#### 参考文献

- [1] HU Junjie, YOU Shi, LING Morten, et al. Coordinated charging of electric vehicles for congestion prevention in the distribution grid [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(2): 703-711.
- [2] 王宜立,张蓉馨,杨再鹤,等.基于双向出行链的电动汽车平抑电网波动策略[J]. 电力工程技术, 2023, 42(4): 50-60.  
WANG Yili, ZHANG Rongxin, YANG Zaihe, et al. Stabilizing power fluctuation strategy based on two-way travel chain of electric vehicle[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(4): 50-60.
- [3] 姚一鸣,赵溶生,李春燕,等.面向电力系统灵活性的电动汽车控制策略[J]. 电工技术学报, 2022, 37(11): 2813-2824.  
YAO Yiming, ZHAO Rongsheng, LI Chunyan, et al. Control strategy of electric vehicles oriented to power system flexibility [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(11): 2813-2824.
- [4] YUE Huanzhan, ZHANG Qian, ZENG Xiaosong, et al. Optimal scheduling strategy of electric vehicle cluster based on index evaluation system[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2023, 59(1): 1212-1221.
- [5] 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.
- [6] LIU Weili, GONG Yuejiao, CHEN Weineng, et al. Coordinated charging scheduling of electric vehicles: a mixed-variable differential evolution approach[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 21(12): 5094-5109.
- [7] LIU Jiayan, LIN Gang, HUANG Sunhua, et al. Collaborative EV routing and charging scheduling with power distribution and traffic networks interaction[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(5): 3923-3936.
- [8] 赵玉,徐天奇,李琰,等.基于分时电价的电动汽车调度策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(11): 92-101.  
ZHAO Yu, XU Tianqi, LI Yan, et al. Research on electric vehicle scheduling strategy based on time-shared electricity price [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 92-101.
- [9] 南斌,徐成司,董树锋,等.考虑多充电模式的充电桩优化控制策略[J]. 电力工程技术, 2021, 40(5): 2-9.  
NAN Bin, XU Chengsi, DONG Shufeng, et al. Optimized control strategy of charging piles considering multiple charging modes[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(5): 2-9.
- [10] LIU Zhaoxi, WU Qiuwei, HUANG Shaojun, et al. Optimal day-ahead charging scheduling of electric vehicles through an aggregative game model[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 5173-5184.
- [11] 李强,宋丹丹,黄地,等.虚拟电厂运营商与电动汽车用户的主从博弈定价策略[J]. 电力工程技术, 2022, 41(4): 183-191.  
LI Qiang, ZHU Dandan, HUANG Di, et al. Stackelberg game pricing strategy between virtual powerplant operators and electric vehicle users[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(4): 183-191.
- [12] WANG Jingyuan, BHARATI Guna R, PAUDYAL Sumit, et al. Coordinated electric vehicle charging with reactive power support to distribution grids[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(1): 54-63.
- [13] 胡泽春,宋永华,徐智威,等.电动汽车接入电网的影响与利用[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 1-11.  
HU Zechun, SONG Yonghua, XU Zhiwei, et al. Impacts and utilization of electric vehicles integration into power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 1-11.
- [14] GINGEME Kenchukwu, WANG Zhanle. Distributed optimal vehicle-to-grid approaches with consideration of battery degradation cost under real-time pricing[J]. IEEE Access, 2020, 8: 5225-5235.
- [15] YANG Qingyu, LI Donghe, AN Dou, et al. Towards incentive for electrical vehicles demand response with location privacy guaranteeing in microgrids[J]. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, 2022, 19(1): 131-148.
- [16] 张谦,邓小松,岳焕展,等.计及电池寿命损耗的电动汽车参与能量-调频市场协同优化策略[J]. 电工技术学报, 2022, 37(1): 72-81.  
ZHANG Qian, DENG Xiaosong, YUE Huanzhan, et al. Coordinated optimization strategy of electric vehicle cluster participating in energy and frequency regulation markets considering battery lifetime degradation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(1): 72-81.
- [17] 蒋玮,单沫文,邓一帆,等.虚拟电厂聚合电动汽车参与碳市

- 场的优化调度策略[J]. 电力工程技术, 2023, 42(4): 13-22, 240.
- JIANG Wei, SHAN Mowen, DENG Yifan, et al. Optimization strategy for aggregating electric vehicles through VPP to participate in the carbon market[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(4): 13-22, 240.
- [18] DUAN Sijing, WANG Dan, REN Ju, et al. Distributed artificial intelligence empowered by end-edge-cloud computing: a survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2023, 25(1): 591-624.
- [19] CHAMOLA Vinay, SANCHETI Ashutosh, CHAKRAVARTY Sombuddha, et al. An IoT and edge computing based framework for charge scheduling and EV selection in V2G systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(10): 10569-10580.
- [20] 仝杰, 齐子豪, 蒲天骄, 等. 电力物联网边缘智能: 概念、架构、技术及应用[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(14): 5473-5496.
- TONG Jie, QI Zihao, PU Tianjiao, et al. Edge intelligence to power internet of things: concept, architecture, technology and application[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(14): 5473-5496.
- [21] 焦昊, 陈锦铭, 刘伟, 等. 基于Infomap算法的配电网边缘划分方法[J]. 电力建设, 2021, 42(7): 65-72.
- JIAO Hao, CHEN Jinming, LIU Wei, et al. Distribution network edge division method based on infomap algorithm [J]. China Electric Power Construction, 2021, 42(7): 65-72.
- [22] 王海林, 焦昊, 陈锦铭, 等. 基于稳定连接的配电网边缘划分方法及应用研究[J]. 电力信息与通信技术, 2020, 18(1): 26-32.
- WANG Hailin, JIAO Hao, CHEN Jinming, et al. Research and application of the method of edge division of distribution network based on stable connection[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2020, 18(1): 26-32.
- [23] NOCEDAL Jorge, WRIGHT Stephen J. Numerical optimization [M]. New York: Springer, 2006.
- [24] 王毅, 麻秀, 万毅, 等. 基于分时充放电裕度的电动汽车有序充放电引导策略[J]. 电网技术, 2019, 43(12): 4353-4361.
- WANG Yi, MA Xiu, WAN Yi, et al. Sequential charge-discharge guidance strategy for electric vehicles based on time-sharing charging-discharging margin[J]. Power System Technology, 2019, 43(12): 4353-4361.
- [25] 董树锋, 葛明阳. EasySolve 使用教程[EB/OL]. (2022-03-15)[2025-04-03]. <https://sgool.zju.edu.cn/solutions/calculator/book/>.
- DONG Shufeng, GE Mingyang. EasySolve using tutorial[EB/OL]. (2022-03-15)[2025-04-03]. <https://sgool.zju.edu.cn/solutions/calculator/book/>.
- [26] 王守相, 陈建凯, 王洪坤, 等. 综合考虑电动汽车充电与储能及可中断负荷调度的配电网两阶段灵活性提升优化方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(11): 1-8.
- WANG Shouxiang, CHEN Jiankai, WANG Hongkun, et al. Two-stage flexibility improvement optimization method of distribution network considering EV charging and scheduling of energy storage and interruptible loads[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(11): 1-8.
- [27] 徐成司, 董树锋, 华一波, 等. 基于改进一致性算法的工业园区分布式综合需求响应[J]. 电工技术学报, 2022, 37(20): 5175-5178.
- XU Chengsi, DONG Shufeng, HUA Yibo, et al. Distributed integrated demand response of industrial park based on improved consensus algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(20): 5175-5178.
- [28] 贾龙, 胡泽春, 宋永华. 考虑不同类型充电需求的城市内电动汽车充电设施综合规划[J]. 电网技术, 2016, 40(9): 2579-2587.
- JIA Long, HU Zechun, SONG Yonghua. An integrated planning of electric vehicle charging facilities for urban area considering different types of charging demands[J]. Power System Technology, 2016, 40(9): 2579-2587.
- [29] 孔祥玉, 杨群, 穆云飞, 等. 分时电价环境下用户负荷需求响应分析方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(10): 75-80.
- KONG Xiangyu, YANG Qun, MU Yunfei, et al. Analysis method for customers demand response in time of using price[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(10): 75-80.
- [30] ZHAO Haiqi, ZHU Yongqing, LU Kaicheng, et al. Edge computing and hybrid control technology for microgrids based on activity on edge networks[J]. Energy Conversion and Economics, 2023, 4(6): 387-400.

收稿日期: 2025-04-03

修改稿日期: 2025-04-28