

考虑配电网运行安全的出行电动汽车充电引导策略

王岩庆¹, 王 骊², 丛若晨¹, 王力成³, 黄一诺¹, 陈道炼¹

(1. 青岛大学电气工程学院, 青岛 266071; 2. 国网浙江省电力有限公司诸暨市供电公司, 诸暨 311800;
3. 浙江工业大学信息工程学院, 杭州 310014)

摘要: 电动汽车在节能减排、推动“双碳”进程等方面有着传统汽车无法比拟的优势。然而, 大规模出行电动汽车无序充电可能会加重配电网负荷波动甚至引起节点电压过低等安全问题。为此, 提出了考虑配电网运行安全的出行电动汽车充电引导策略。首先, 基于配电网原始负荷及节点电压情况, 建立了分区域分时电价定价模型, 建立电价与负荷情况之间的相关性; 其次, 以所制定的电价为基础, 在各个充电站分别制定电动汽车充电行为预备调度方案, 调度的原则是电动汽车的充电费用最低, 从而引导电动汽车在负荷低谷进行充电, 参与配电网的负荷优化; 再次, 建立以充电费用、出行总时间以及行程距离三者权值之和最小为目标的电动汽车充电站选择函数, 为电动汽车推荐充电站并规划最优行驶路径, 同时提升用户经济性和配电网运行的安全性; 最后, 以修改的 IEEE33 节点配电网为例, 验证了该策略可以有效提升电动汽车用户出行满意度并兼顾配电网的运行安全。

关键词: 电动汽车; 配电网运行安全; 分区域分时电价; 路径规划; 充电引导; 充电站

Charging Guidance Strategy of Traveling Electric Vehicle Considering the Operation Safety of Distribution Network

WANG Yanqing¹, WANG Xiao², CONG Ruochen¹, WANG Licheng³, HUANG Yinuo¹, CHEN Daolian¹

(1. School of Electrical Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China;
2. Zhiji Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Company, Zhiji 311800, China;
3. School of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Electric vehicles have incomparable advantages over traditional vehicles in terms of energy saving and emission reduction and promoting the “dual carbon” process. However, disordered charging of large-scale electric vehicles may aggravate the load fluctuation of distribution network and even cause safety problems such as low node voltage. This paper proposes a charging guidance strategy for traveling electric vehicles considering the safety of distribution network operation. First, based on the original load and node voltage of the distribution network, a sub-regional time-of-use price pricing model is established to establish a correlation between the electricity price and the load situation. Secondly, based on the formulated electricity price, the preparatory scheduling for charging behavior of electric vehicles in different charging regions is put forward. The principle of scheduling is that the charging cost of electric vehicles is the lowest, so as to guide electric vehicles to charge in the load valley and participate in the load optimization of the distribution network. Thirdly, the sum of the weights of charging cost, total travel time, and travel distance is set as the minimum to establish a selection function for the electric vehicle charging station, thus charging stations and plans of the optimal driving path for electric vehicles can be recommended, and the user economy and the operation safety of the distribution network can be optimized. Finally, the modified IEEE 33-node distribution network is taken as an example to verify that this strategy can effectively improve the travel satisfaction of electric vehicle users and take into account the operation safety of the distribution network.

Key words: electric vehicle; safe operation of distribution network; time-of-use electricity price in different regions; route planning; charging guidance; charging station

0 引言

2020年11月2日, 国务院办公厅发布了《新能

源汽车产业发展规划(2021—2035年)》, 该文提出应当鼓励各级政府加大对新能源汽车产业的支持力度, 丰富新能源汽车各项优惠政策。因此, 未来一段时间我国电动汽车规模的持续增长将成为必然。然而, 大量电动汽车出行过程中的无序充电不但会给用户带来充电满意度差、充电排队拥挤等问题^[1-2], 还会给配

基金资助项目: 国家自然科学基金(52007170); 青岛大学本科教学研究与改革项目(JXGG2020012)。

Project supported by National Natural Science Foundation of China (52007170), Undergraduate Teaching Research and Reform Project of Qingdao University (JXGG2020012).

电网运行安全带来压力^[3-4]。因此,有必要通过有效的引导策略,为电动汽车推荐充电站并规划充电行为,在提高电动汽车出行满意度的同时,减少大规模电动汽车无序充电对配电网运行安全的影响。

电动汽车作为可调度负荷,现已有大量文献对其参与配电网优化展开了研究。文献[5]提出了电动汽车充电调度模型,指出在用电低谷时段完成电动汽车的充电,可以降低负荷曲线峰谷差;文献[6]提出了基于电价和碳配额双重激励的微电网优化调度策略,有效提高了电动汽车参与调度的积极性;文献[7]建立了2层优化模型,在配网层制定充电站的充电计划,在充电站层确定各电动汽车的充电计划;文献[8]建立了配电网2层最优经济调度模型,实现了以电动汽车用户成本、网损成本和配电网系统总负荷均方差最小为目标的多方优化;文献[9]提出了一种调度电动汽车群充电优化的方法,保证了每辆车在用户设定的截止时间之前完成充电,并降低了负载峰值。上述文献将闲置状态下的电动汽车作为研究对象,对其参与配电网优化问题展开了研究,但并未对出行中的电动汽车进行分析研究。

当电动汽车在行驶途中出现充电需求时,需合理选择充电站及时充电,因此,也有很多学者对出行电动汽车充电路规划及充电站选择问题展开了研究。文献[10]以用户出行总成本最小为目标对电动汽车进行充电导航优化;文献[11]基于用户出行数据对电动汽车充电需求进行模拟,解决了电动汽车用户充电需求的不确定性问题;文献[12]设计了一种在线状态递归算法,利用在线信息为电动汽车提供准确的导航;文献[13]提出了一种计及里程焦虑心理效应的电动汽车充放电调度策略,可有效降低调度成本及里程焦虑情况;文献[14]综合考虑路网、出租车充电需求以及充电站利用率,提出了一种电动汽车充电引导策略,可以实现电动汽车出行优化并使各充电站的利用率均衡分布;文献[15]提出了一种考虑多车辆相互作用的快速充电站电动汽车动态响应策略,建立了电动汽车动态路径选择模型。然而,上述文献在研究出行电动汽车充电路规划时,未将重点放在其充电负荷给配电网运行安全带来的消极影响方面。

目前,针对在出行电动汽车充电路规划时兼顾配电网运行安全的研究较少,文献[16]将电动汽车、配电网以及交通网各自的目标耦合到道路路阻上,得到了综合路阻函数,为电动汽车推荐行驶路

径,降低了出行电动汽车充电行为对交通网和配电网的影响。

本文针对电动汽车出行充电问题提出了一种兼顾配电网运行安全和用户满意度的出行电动汽车充电引导策略,根据原始负荷情况及电压情况建立了分区域分时电价,将电价与配电网初始情况建立关联,引导电动汽车在低负荷点进行充电。同时,把电价代入到了电动汽车的出行优化模型中,在考虑配电网运行安全的情况下,优化出行电动汽车的出行总成本。最后,通过算例仿真验证了本文引导策略在实现用户出行充电经济性,平抑配电网负荷及改善充电站节点电压方面的优势。

1 充电引导构架

在未来电动汽车智能联网的情况下,电动汽车用户可以向智能联网系统上传实时电量、位置等充电信息,系统通过分析电动汽车状态、充电站运营情况以及实时电价等信息,为电动汽车合理推荐充电站,规划最佳行驶路径并调度电动汽车在充电站内的具体充电行为。

1.1 考虑配电网运行安全的分区域分时电价

若电动汽车不考虑节点电压情况随机选择充电站,则可能出现在电压较低的充电站节点大规模充电的情况,导致该节点电压降落更为严重,给配电网运行安全带来严重威胁。基于此,考虑配电网节点电压情况建立分区域电价,通过在电压相对较低的充电站节点制定较高的充电电价,引导电动汽车在其他充电站充电,避免该充电站节点电压降落更加严重的情况。此外,若电动汽车不考虑配电网负荷情况进行随机充电,则可能出现电动汽车在负荷峰值时段集中充电的情况,从而产生“峰上加峰”的现象。基于此,考虑配电网原始负荷情况进行分时电价定价,引导电动汽车在负荷低谷时段进行充电,从而减小出行电动汽车充电负荷对配电网负荷波动的影响。

基于此,本文提出了一种考虑配电网运行安全的分区域分时电价,在电价制定时充分考虑配电网节点电压以及负荷情况。希望通过所制定的电价改变电动汽车的充电站选择及充电行为,从而减小出行电动汽车无序充电对配电网运行安全的影响。

1.2 充电引导研究思路

本文所制定的充电引导策略包含为电动汽车选择适当的充电站以及调度其在充电站接入时间内

的具体充电行为, 充电引导框架如图 1 所示, 具体制定方式如下所述。

首先, 考虑配电网原始负荷及节点电压情况建立分区域分时电价定价模型。其次, 建立电动汽车充电行为调度模型, 制定该模型的原因在于: 经研究发现, 如果不对电动汽车在充电站接入时间内的充电行为进行引导, 而是采用“到站即额定功率持续充满”的方式进行充电, 那么电动汽车充电负荷对配电网负荷波动问题的改善效果并不明显^[17]。通过该模型可以分别计算电动汽车在各个可选择充电站的最优充电行为以及对应的最低充电费用。最后, 根据上一步得出的各充电站内对应的最低充电费用建立以充电费用、出行总时间和行程距离三者的权值之和最小为目标的充电站选择模型, 为电动汽车

推荐最优充电站。

1.3 基于电动汽车-充电站-配电网交互的出行电动汽车充电引导流程

在完成分区域分时电价定价后, 以该电价为基础对出行电动汽车进行充电引导。本文将出行电动汽车充电引导过程分为 3 步, 引导流程图如图 2 所示, 具体步骤如下:

步骤 1) 在系统内输入电动汽车充电信息并实时更新充电站状态。电动汽车充电信息包括: 初始位置、目的位置、剩余电量、预计接入时长等; 充电站状态包括: 实时充电电价、站内电动汽车状态、预计充电等待时间等。

步骤 2) 确定电动汽车充电引导方案。电动汽车充电引导方案的确定分为两方面: 对于充电急迫

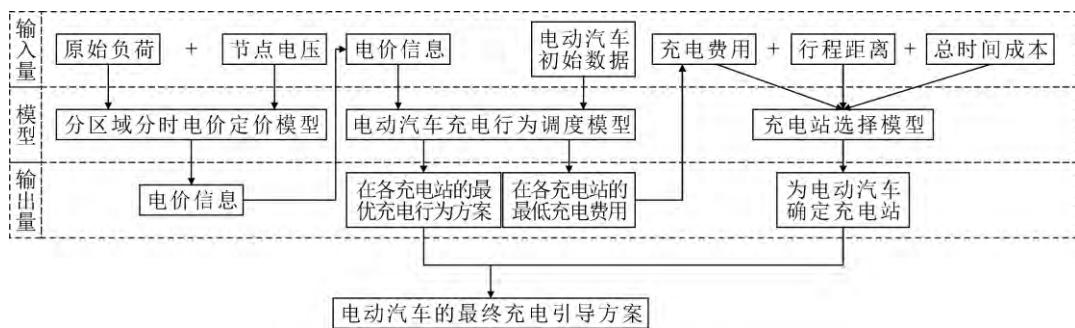


图 1 电动汽车充电引导框架图

Fig.1 Electric vehicle charging guide frame diagram

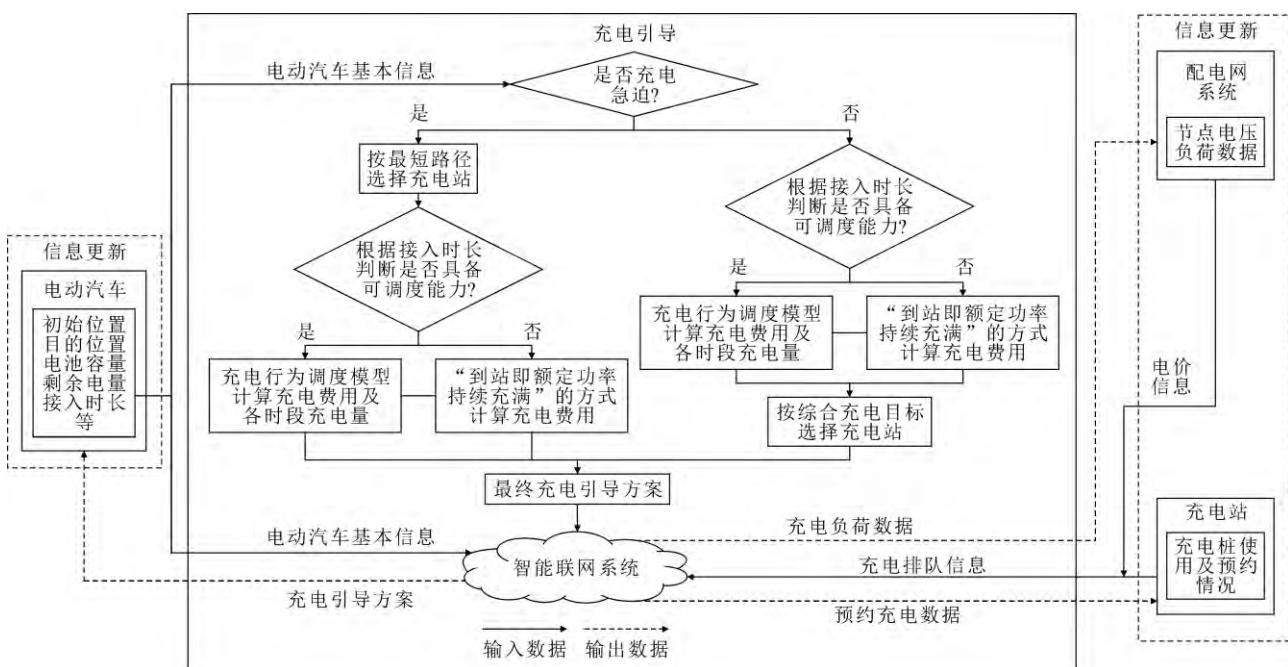


图 2 兼顾配电网运行安全的出行电动汽车充电引导流程图

Fig.2 Flow chart of charging guidance for traveling electric vehicles that takes into account the safety of distribution network operation

(电动汽车剩余电量低于电池电量安全阈值 S_{min})的电动汽车,首先以最短路径选择充电站,然后确定电动汽车在各充电站的最低充电费用及最优充电行为;对于充电不急迫的电动汽车,首先确定电动汽车在各充电站的最低充电费用及最优充电行为,然后根据该充电费用采用考虑充电费用、出行总时间以及行程距离的综合目标为电动汽车选择充电站。电动汽车在各充电站的最低充电费用及最优充电行为的确定也分为以下两方面:首先判断电动汽车的可调度能力(具备可调度能力的电动汽车以额定功率持续充满电所需的时长应小于其在充电站的预计停留时长),对于可调度的电动汽车,其充电费用及充电行为按充电行为调度模型进行计算,对于不可调度的电动汽车,其充电费用按照“到站即额定功率持续充满”的方式计算。

步骤3)根据步骤2)确定电动汽车的最终充电引导方案,对各电动汽车进行充电引导并规划行驶路径,将充电引导数据、充电负荷数据、预约充电数据分别传送给电动汽车用户、配电网系统以及充电站,完成所有电动汽车导航后退出调度。

2 考虑配电网运行安全的分区域分时电价定价模型

各充电站的充电电价影响着出行电动汽车的充电选择,继而会影响配电网系统的运行状态^[18]。在未来电力市场发展的情况下,充电站电价制定应全面考虑配电网负荷、节点电压等方面的因素。通过对各时段各充电站进行电价调整,既可以减小电动汽车的出行成本,又可以引导用户实现负荷平衡并保证系统安全运行。

2.1 考虑配电网节点电压的分区域电价定价模型

电动汽车在电压较低的充电站节点集中充电会使该节点电压降落更加严重^[19],因此,可以通过在电压相对较低的充电站节点制定较高的充电电价,来引导电动汽车在其他充电站充电,从而避免该充电站节点电压降落更加严重。以节点电压为分区域因素,建立考虑配电网节点电压的分区域电价,得到 t 时刻充电站 k 的充电电价 $c_{k,t}$

$$c_{k,t} = c_{EV} + c_{EV} \theta (1 - U_{k,t}) \quad (1)$$

式中: c_{EV} 为基础充电电价; θ 为基础电价调整系数,本文取5; $U_{k,t}$ 为 t 时刻充电站 k 的节点电压标幺值。

2.2 考虑配电网运行安全的分区域分时电价定价模型

电动汽车在负荷较高的时段进行集中充电,会

使该时段产生“峰上加峰”的现象^[20],因此在电价制定时应考虑原始负荷情况。

当配电网负荷低于平均负荷时,应在考虑配电网节点电压分区域电价的基础上,按照负荷缺额比例降低充电电价;当配电网负荷高于平均负荷时,应在考虑配电网节点电压分区域电价的基础上,按照负荷超额比例增加充电电价。因此,以式(1)所示的电价以及配电网原始负荷情况为基础,建立分区域分时电价,得到 t 时刻充电站 k 的充电电价 $c_{k,t}^{ch}$

$$c_{k,t}^{ch} = c_{k,t} \left(1 + \sigma \frac{P_{load,t} - P_{ave}}{P_{ave}} \right) \quad (2)$$

式中: σ 为综合电价调整系数,本文取1/3,使电价浮动范围限制在0.95~2.2元/(kW·h)之间; $P_{load,t}$ 为 t 时刻配电网原始负荷(分布式电源出力按负的负荷计算)之和; P_{ave} 为配电网负荷均值,计算式为

$$P_{ave} = \frac{\sum_{t=1}^{24} P_{load,t}}{24} \quad (3)$$

设置电价波动范围上下限约束为

$$\underline{\delta} c_{EV} \leq c_{k,t}^{ch} \leq \bar{\delta} c_{EV} \quad (4)$$

式中 $\bar{\delta}$ 和 $\underline{\delta}$ 分别为电价波动上、下限比例,本文取值分别为5/3和2/3。

3 电动汽车充电行为调度及充电站选择模型

本章建立了电动汽车充电行为调度及充电站选择模型,电动汽车以3.1节建立的充电行为调度模型计算其在各充电站的充电费用,并将该充电费用作为初步条件,通过3.2节的充电站选择模型进行充电站选择并规划最佳行驶路径。

3.1 电动汽车充电行为调度模型

经前期研究发现,即使根据配电网情况进行了电价定价,但若负荷高峰时段接入充电站的电动汽车按照“到站即额定功率持续充满”的方式进行充电,其充电负荷对配电网负荷波动问题的改善效果仍不明显。因此,本文通过调整电动汽车接入充电站时间内的各时段充电量,进一步降低配电网系统的负荷波动并优化充电费用。

调整电动汽车在不同时段充电量大小的充电方式一般有2种:一种是非恒功率充电,通过改变各时段充电功率大小来改变各时段的充电量;另一种是恒功率充电,通过改变各时段的充电时长来改变各时段的充电量。本文采取第2种调度方法,即保持电动汽车充电功率恒定,通过调整各时段的充

电时长来改变各时段的充电量。

为保证电动汽车用户的出行满意度, 接入充电站的电动汽车在驶离充电站时应尽量保证电量充满, 因此, 首先判断电动汽车的状态是否具备可调度能力。具备可调度能力的电动汽车接入充电站的时长与充电时长之间应满足

$$T_{ac} \geq T_{s,ch} \quad (5)$$

式中: T_{ac} 为电动汽车接入充电站的时长; $T_{s,ch}$ 为电动汽车 s 到达充电站后, 以额定功率持续充满电所需的充电时长。

电动汽车接入充电站的时长根据车主的意愿决定, 而电动汽车充电所需时长 $T_{s,ch}$ 计算式为

$$T_{s,ch} = \frac{E - E_{s,a}}{P_{EV}} \quad (6)$$

式中: E 为电动汽车电池容量; $E_{s,a}$ 为接入充电站时电动汽车 s 的剩余电池容量; P_{EV} 为电动汽车充电功率。

对于可调度的电动汽车 s , 通过调整电动汽车接入充电站 k 期间内各时段的充电时长, 为其制定最低充电成本的优化目标函数, 如式(7)所示, 通过该目标函数可以求得电动汽车 s 在充电站 k 的最低充电费用, 并规划各时段的充电量。

$$C_k = \min \left(\sum_{t=\lceil t_{st} \rceil}^{\lceil t_{end} \rceil} P_{EV} t_{s,ch} c_{k,t}^{\text{ch}} \right) \quad (7)$$

式中: $\min(\cdot)$ 表示求最小值; t_{st} 、 t_{end} 分别为电动汽车接入充电站时刻以及离开充电站时刻; $\lceil t_{st} \rceil$ 、 $\lceil t_{end} \rceil$ 分别为 t_{st} 向上取整以及 t_{end} 向上取整的时刻; $t_{s,ch}$ 为电动汽车 s 在 t 时段的充电时长; $c_{k,t}^{\text{ch}}$ 为分区域分时电价。

电动汽车在各时段充电时长 $t_{s,ch}$ 应满足各时段充电时长上下限约束, 即

$$0 \leq t_{s,ch} \leq t_{s,ch}^{\text{max}} \quad (8)$$

式中 $t_{s,ch}^{\text{max}}$ 为电动汽车在 t 时段的充电时长上限。电动汽车进入充电站时所在时段的充电时长上限为 $\lceil t_{st} \rceil - t_{st}$; 电动汽车离开充电站时所在时段的充电时长上限为 $t_{end} - \lfloor t_{end} \rfloor$, 其中 $\lfloor t_{end} \rfloor$ 为 t_{end} 向下取整的时刻; 其余时段充电时长上限均为 1。

本文优化模型下电动汽车用户满意度主要基于 2 个方面的考虑: 一方面是用户出行充电总成本最小^[21]; 另一方面是用户离开充电站时的电量满意度。对于出行电动汽车来讲, 保证出行过程中电量充足是用户最关心的, 因此, 为提升用户离站时的电量满意度, 保证可调度电动汽车在离开充电站时

电量充满, 建立电动汽车充电时长约束

$$\sum t_{s,ch} = T_{s,ch} \quad (9)$$

对于不可调度电动汽车在接入充电站后, 其在充电站 k 的充电费用 C_k 按照“到站即额定功率持续充满”的原则进行计算, 如式(10)所示。

$$C_k = \int_{t_{st}}^{t_{end}} P_{EV} c_k dt \quad (10)$$

式中 c_k 为充电站 k 的分区域分时电价。

3.2 电动汽车充电站选择模型

本节综合考虑充电费用、出行总时间以及行程距离为电动汽车选择充电站, 以降低电动汽车出行的总成本, 提升电动汽车用户出行满意度。建立电动汽车充电站选择优化目标函数

$$\begin{cases} \min F = \min(F_1, F_2, \dots, F_k, \dots, F_n) \\ F_k = \omega_1 \frac{f_{1,k}}{f_{1\max}} + \omega_2 \frac{f_{2,k}}{f_{2\max}} + \omega_3 \frac{f_{3,k}}{f_{3\max}} \end{cases} \quad (11)$$

其中:

$$f_{1,k} = d_{0,k} + d_{k,D} \quad (12)$$

$$f_{2,k} = \frac{d_{0,k} + d_{k,D}}{v} + T_{k,w} + T_{ac} \quad (13)$$

$$f_{3,k} = C_k \quad (14)$$

$$k \in C_s \quad (15)$$

式中: $f_{1\max}$ 、 $f_{2\max}$ 以及 $f_{3\max}$ 分别为各充电站选择中行程距离、总时间成本以及充电费用的最大值; n 为充电站个数; k 为选择的充电站编号; $d_{0,k}$ 为电动汽车初始节点到充电站 k 的最短路径距离; $d_{k,D}$ 为电动汽车从充电站 k 到目的节点的最短路径距离; v 为道路行驶速度; $T_{k,w}$ 为选择第 k 个充电站时的预计排队等待时间; C_k 为电动汽车在充电站 k 充电时的充电费用, 该充电费用按照充电行为调度模型计算; ω_1 、 ω_2 、 ω_3 分别为各优化目标的权重系数, 本文取均为 1/3, 以达到各目标综合最优; C_s 为所有充电站的合集。

电动汽车状态包括 3 类: 正在充电的电动汽车、已预约充电且在路上行驶的电动汽车以及由于非充电原因在充电桩停留的电动汽车。为防止充电排队冲突, 本文充电站的实时排队模型按照各电动汽车的充电预约时刻排序, 为电动汽车预留充电桩, 并对充电站排队模型进行实时更新, 因此充电等待时间为

$$T_{k,w} = \begin{cases} 0, & n_k > n_a + n_b + n_c \\ T_{last} - t_1 - \frac{d_{0,k}}{v}, & n_k \leq n_a + n_b + n_c \end{cases} \quad (16)$$

式中: n_k 为充电站 k 内充电桩的个数; n_a 、 n_b 和 n_c 分别为充电站内正在充电、已预约充电以及非充电

原因在充电桩停留的电动汽车数量; t_1 为电动汽车发出充电请求时刻; T_{last} 为计算得到的站内正在充电或已预约充电最快结束充电的时刻。

各时刻充电站内电动汽车充电数量 $n_{k,t}$ 应小于站内的充电桩数, 因此设置充电站充电数量约束为

$$0 \leq n_{k,t} \leq n_k \quad (17)$$

建立配电网节点电压及线路潮流约束如式(18)、式(19)所示。

$$U_k^{\min} \leq U_{k,t} \leq U_k^{\max} \quad (18)$$

$$I_{ij,t} \leq I_{ij}^{\max} \quad (19)$$

式中: $U_{k,t}$ 为 t 时刻节点 k 的电压; $U_{k,t}^{\min}$ 和 $U_{k,t}^{\max}$ 分别为节点电压上、下限; I_{ij}^{\max} 为支路电流 $I_{ij,t}$ 的上限。

在 t 时刻电动汽车发出充电请求后, 如果其电量低于电池电量安全阈值 S_{\min} , 则此时电动汽车充电需求较为急迫, 应立刻驶往距离最近的充电站进行充电, 本文采用 floyd 算法为电动汽车选择充电站, 并规划从初始位置经过充电站充电后到目的位置的最优路径。优化目标为

$$\begin{cases} \min D = \min(D_1, D_2, \dots, D_k, \dots, D_n) \\ D_k = d_{0,k} + d_{k,D} \end{cases} \quad (20)$$

式中 D_k 为电动汽车从初始节点经过充电站 k 充电后到目的节点的最短路径距离。

荷电状态低于电池电量安全阈值的电动汽车在选择完充电站后, 其各时段的充电量及充电费用同样按照充电行为调度模型进行计算。

由于充电站位置是固定的, 所以在实际应用过程中, 对于荷电状态低于电池电量安全阈值过多, 且距离充电站较远的极个别电动汽车, 可能会出现由于电池电量不足而无法支撑其到达距离最近充电站的情况, 这是无法避免的。然而本文并未将研究重点放在该部分电动汽车上, 因此对于初始电量低于电池电量安全阈值的电动汽车, 若不满足式(21)所示的约束, 则将其在充电站排队模型中移除, 不考虑该汽车对配电网和充电站的影响。

$$E_{\text{st}} \geq E_c D_c \quad (21)$$

式中: E_{st} 为电动汽车初始电量; E_c 为每千米能耗; D_c 为电动汽车初始位置与距离电动汽车最近的充电站间的最短路径距离。

4 算例分析

4.1 算例参数

本文以修改的 IEEE 33 节点配电网及文献[10]

所建立的交通路网图为例, 验证该引导策略的有效性。该配电网-路网系统中, 分布式电源及充电站接入的配电网及交通路网节点对应关系如附录表 A1 所示, 路网-电网交互拓扑图如附录图 A1 所示, 假设所研究区域内共有 400 辆电动汽车, 出行时刻概率^[22]如附录图 A2 所示, 接入充电站时长^[23]如附录图 A3 所示, 电动汽车的其余参数如附录表 A2 所示。分布式电源出力数据以及常规负荷数据^[7]如附录图 A4 所示。

4.2 仿真结果分析

本文算例设置了 5 种情景: 情景 1, 无电动汽车的情况; 情景 2, 常规分时电价^[10]引导, 电动汽车以“到站即额定功率持续充满”的方式安排充电, 以最短路径选择充电站; 情景 3, 常规分时电价引导, 电动汽车以“到站即额定功率持续充满”的方式安排充电, 以考虑充电费用、出行总时间以及行程距离的综合出行成本最优为目标进行引导; 情景 4, 本文电价(分区域分时电价)引导, 电动汽车以“到站即额定功率持续充满”的方式安排充电, 以考虑充电费用、出行总时间以及行程距离的综合出行成本最优为目标进行引导; 情景 5, 本文电价引导, 电动汽车以 3.2 节的充电行为调度模型安排充电, 以考虑充电费用、出行总时间以及行程距离的综合出行成本最优为目标进行引导

其中, 情景 2 和情景 3 按照文献[10]所示的常规分时电价进行引导, 电价详情如表 1 所示。情景 4 和情景 5 则在电价 1.2 元/(kW·h)的基础上进行分区域分时电价调整后, 再对电动汽车进行引导。后文所提常规分时电价引导、本文电价引导不做标注即指情景 3 和情景 5。

4.2.1 不同情景对电动汽车优化结果的影响

根据本文优化方法, 得到各类情景下电动汽车充电数据如表 2 所示。对表 2 中 4 种情景下的规划结果进行对比, 以情景 2 为参照建立如图 3 所示的对比图。

由表 2 和图 3 可知, 情景 3 的电动汽车以综合

表 1 常规分时电价情况

Table 1 Regular time-of-use tariffs

电价	执行时段
1.8044 元/(kW·h)	10:00—15:00、18:00—21:00
1.4950 元/(kW·h)	7:00—10:00、15:00—18:00、 21:00—23:00
1.1946 元/(kW·h)	23:00—07:00

表 2 不同情景下的电动汽车充电优化结果

Table 2 Electric vehicle charging optimization results under different scenarios

指标	情景 2	情景 3	情景 4	情景 5
路径成本/km	5718	5760	5860	5837
时间成本/h	888	881	902	898
充电费用/元	22 792	22 337	19 343	18 846
等待时间/h	21.9	16.0	30.3	29.5

出行目标最优进行引导, 相对仅以最短路径选择充电站的情景, 其路径成本有所增加, 但综合优化目标情境下电动汽车的总充电费用由最短路径情境下的 22 792 元降低到了 22 337 元, 降低了 2%, 其在充电站的总排队等待时间由 21.9 h 降低到了 16.0 h, 降低了 26.94%。由此可以看出, 采用综合目标对电动汽车进行引导, 可以有效减小电动汽车出行总时间以及排队等待时间, 并降低充电费用, 使电动汽车综合引导结果更优。

由于情景 4 和情景 5 的充电电价在制定时考虑了节点电压的因素, 而电动汽车车主在充电选择上更青睐电价相对较低的充电站, 因此在电价较低的充电站节点可能会发生充电聚集的现象, 使得其等待时间相对情景 2、3 有所升高。相较情景 4, 情景 5 以充电行为调度模型为电动汽车安排充电, 可以使电动汽车在接入时间内以系统规划的最低充电成本进行充电引导, 从而使该情景下电动汽车的各类成本数据相较情景 4 均有所降低。

4.2.2 不同情景对节点电压的影响

无电动汽车以及常规分时电价引导的电动汽车的电网节点电压(标么值)分布情况如图 4、图 5 所示。由图 4、图 5 可知, 在充电站接入大量电动汽车后, 整体电压均出现大幅下降的情况, 尤其在 08:00—09:00 附近, 受电动汽车接入影响, 节点 17(2 号充电站)附近电压降落尤为严重, 在 09:00 时, 该节点附近出现了 4 个节点电压出现低于 0.9 的情况, 对配电网运行安全造成了严重的影响。

对比不同情境下节点 17 的电压情况, 结果如图 6 所示, 常规分时电价引导时, 节点 17 的电压(标么值)在 09:00 时降落到了 0.897, 低于节点电压安全阈值, 从而对电网电压产生了严重的影响。电动汽车经本文电价引导后, 节点电压分布情况如图 7 所示。由图 6 及图 7 可知, 经过本文电价调整后, 在 08:00—09:00 附近, 由于节点 17 的电压较低, 故该节点电价相对其他充电站节点电价较高, 更容

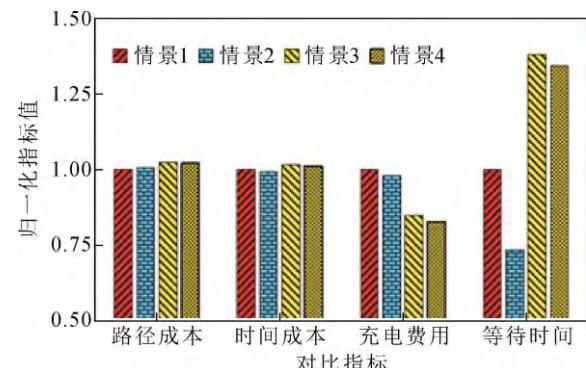


图 3 不同情景下的电动汽车优化结果对比图

Fig.3 Comparison of optimization results of electric vehicles under different scenarios

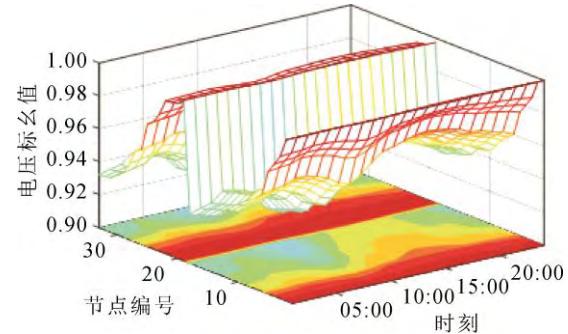


图 4 无电动汽车时节点的电压情况

Fig.4 Voltage situation of the node without electric vehicle

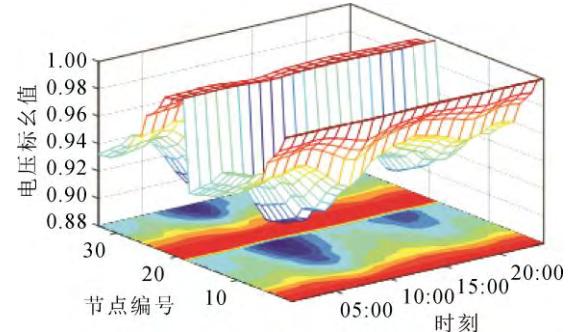


图 5 常规分时电价引导的节点电压情况

Fig.5 Voltage situation of the node guided by conventional time-of-use price

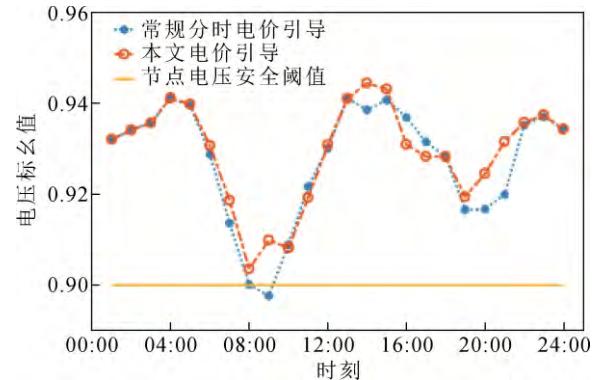


图 6 不同情境下配电网 17 节点的电压

Fig.6 Voltages of number 17 nodes in the distribution network under different scenarios

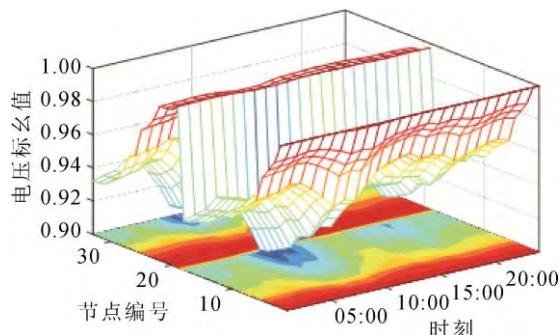


图 7 本文电价引导的节点电压情况

Fig.7 Node voltage situation guided by electricity price in this article

易引导电动汽车到其他充电站进行充电,因此改善了该节点及附近节点的电压,使该节点电压提升到了0.91,此时,系统中各节点均未出现电压低于节点电压安全阈值的情况。故采用本文的电动汽车引导策略,将有助于提升配电网系统的运行安全。

4.2.3 不同情景对负荷波动的影响

为分析不同情景下电动汽车充电对配电网负荷的影响,得到不同情景下配电网负荷曲线如图8所示。对比采用本文电价引导,但电动汽车以“到站即额定功率持续充满”的方式安排充电的负荷情况与常规分时电价引导的负荷情况,负荷变化较小,无法有效实现负荷平移的效果。相对来讲,本文情境下的电动汽车在接入时间内合理分配各时段充电量,不但可以降低充电费用,还可以使汽车在电价较低时段完成大部分充电,从而有效改善配电网的负荷波动情况。

表3展示了各类情景下负荷峰谷差、净负荷波动方差的情况。由表3和图8可看出,本文优化情景可以使电动汽车在接入时间内合理充电,使充电负荷较合理分布,从而有效减小系统负荷波动。相较电动汽车以“到站即额定功率持续充满”的方式安排充电的情景,负荷方差从原来的371 172.46 kW²降低至326 660.79 kW²,使负荷波动趋于平缓;系统净负荷峰谷差也由2473.08 kW降低至2084.74 kW,有效实现了削峰填谷的效果。但由于本文电动汽车为出行充电,接入充电站的时间较短,无法实现较长时间的负荷平移,因此负荷曲线优化情况不够突出。

5 结论

本文提出了一种兼顾配电网运行安全和用户满意度的充电引导策略,具有以下特点:

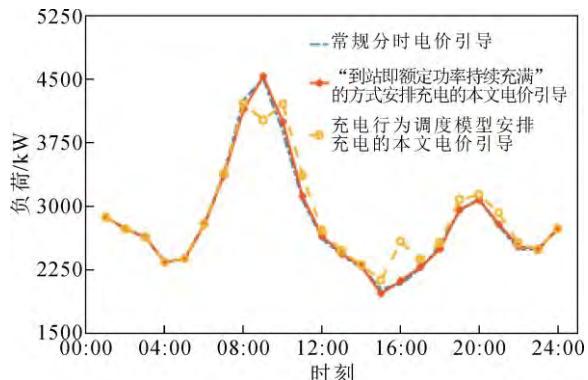


图 8 不同情景下配电网负荷曲线

Fig.8 Distribution network load curves in different scenarios

表3 不同情景电动汽车充电后负荷数据对比

Table 3 Comparison of electric vehicle load data in different scenarios after charging

引导情景	负荷峰谷差/kW	负荷波动值/kW ²
常规分时电价引导	2555	383 820
“到站即额定功率持续充满”的方式安排充电的本文电价引导	2473	371 173
充电行为调度模型安排充电的本文电价引导	2084	326 660

1) 将考虑充电费用、出行总时间以及行程距离的综合出行目标最优作为电动汽车的引导目标,可以为电动汽车合理推荐充电站,优化电动汽车时间成本、充电费用等各项出行充电数据。

2) 基于本文所建立的分区域分时电价,通过对电动汽车充电负荷时空转移能力的利用,调度电动汽车的充电站选择及各时段充电量,可以有效降低电动汽车充电负荷对配电网运行安全带来的消极影响。

总体而言,本文建立的充电引导策略可以兼顾电动汽车出行需求、配电网运行安全,实现多方优化。

附录见本刊网络版(<http://hve.epri.sgcc.com.cn>)。

参考文献 References

- [1] GAO H, YU X H. Optimal modeling of intelligent guidance charging for urban areas electric vehicles[C]//2018 5th IEEE International Conference on Cloud Computing and Intelligence Systems (CCIS). Nanjing, China: IEEE, 2018: 1038-1042.
- [2] 李东东,段维伊,林顺富,等.实时电价条件下基于用户引导的电动汽车-充电桩匹配策略[J].电力系统自动化,2020,44(8): 74-82. LI Dongdong, DUAN Weiyi, LIN Shunfu, et al. User guidance based matching strategy for electric vehicle-charging pile in condition of real-time electricity price[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(8): 74-82.
- [3] 潘振宁,余涛,王克英.考虑多方主体利益的大规模电动汽车分布式实时协同优化[J].中国电机工程学报,2019,39(12): 3528-3540. PAN Zhenning, YU Tao, WANG Keying. Decentralized coordinated dispatch for real-time optimization of massive electric vehicles

considering various interests[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(12): 3528-3540.

[4] 宋晓通, 吕倩楠, 孙 艺, 等. 基于电价引导的电动汽车与综合能源系统交互策略[J]. 高电压技术, 2021, 47(10): 3744-3754. SONG Xiaotong, LÜ Qiannan, SUN Yi, et al. Interactive strategy of electric vehicles and integrated energy system based on electricity price guidance[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(10): 3744-3754.

[5] YANG H Y, ZHANG Y Y, MA Y H, et al. Valley-period dispatched strategy of electric vehicles in charging station[C] // 2019 4th International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid (IGBSG). Yichang, China: IEEE, 2019: 652-656.

[6] 李咸善, 陈敏睿, 程 杉, 等. 基于双重激励协同博弈的含电动汽车微电网优化调度策略[J]. 高电压技术, 2020, 46(7): 2286-2296. LI Xianshan, CHEN Minrui, CHENG Shan, et al. Research on optimal scheduling strategy of microgrid with electric vehicles based on dual incentive cooperative game[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(7): 2286-2296.

[7] 王行行, 赵晋泉, 王 珂, 等. 考虑用户满意度和配网安全的电动汽车多目标双层充电优化[J]. 电网技术, 2017, 41(7): 2165-2172. WANG Xingxing, ZHAO Jinquan, WANG Ke, et al. Multi-objective bi-level electric vehicle charging optimization considering user satisfaction degree and distribution grid security[J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2165-2172.

[8] 郝丽丽, 王国栋, 王 辉, 等. 考虑电动汽车入网辅助服务的配电网日前调度策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(14): 35-43. HAO Lili, WANG Guodong, WANG Hui, et al. Day-ahead scheduling strategy of distribution network considering electric vehicle-to-grid auxiliary service[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(14): 35-43.

[9] KANCHEV H C, SHTEREV V A, HINOV N L. Strategy for dispatching of multiple electric vehicles recharging in a microgrid[C] // 2018 IEEE XXVII International Scientific Conference Electronics (ET). Sozopol, Bulgaria: IEEE, 2018: 1-4.

[10] 苏 粟, 杨恬恬, 李玉璟, 等. 考虑实时动态能耗的电动汽车充电路径规划[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(7): 136-143. SU Su, YANG Tiantian, LI Yujing, et al. Charging route planning for electric vehicles considering real-time dynamic energy consumption[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(7): 136-143.

[11] 臧海祥, 舒宇心, 傅雨婷, 等. 考虑多需求场景的城市电动汽车充电站多目标规划[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 67-80. ZANG Haixiang, SHU Yuxin, FU Yuting, et al. Multi-objective planning of an urban electric vehicle charging station considering multi demand scenarios[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 67-80.

[12] LIU C S, ZHOU M, WU J, et al. Electric vehicles en-route charging navigation systems: joint charging and routing optimization[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2019, 27(2): 906-914.

[13] 侯 慧, 王逸凡, 吴细秀, 等. 长时间尺度下计及里程焦虑心理效应的电动汽车充放电调度策略[J]. 高电压技术, 2023, 49(1): 85-93. HOU Hui, WANG Yifan, WU Xixiu, et al. Charging and discharging scheduling strategy for electric vehicles considering psychological effect of mileage anxiety in long-time scale[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(1): 85-93.

[14] 黄 晶, 杨健维, 王 湘, 等. 下一目的地导向下的电动汽车充电引导策略[J]. 电网技术, 2017, 41(7): 2173-2179. HUANG Jing, YANG Jianwei, WANG Xiang, et al. Destination oriented electric vehicle charging guiding strategy[J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2173-2179.

[15] LIU X O. Dynamic response characteristics of fast charging station-EVs on interaction of multiple vehicles[J]. IEEE Access, 2020, 8: 42404-42421.

[16] 邢 强, 陈 中, 冷钊莹, 等. 基于实时交通信息的电动汽车路径规划和充电导航策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(2): 534-549. XING Qiang, CHEN Zhong, LENG Zhaoying, et al. Route planning and charging navigation strategy for electric vehicles based on real-time traffic information[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(2): 534-549.

[17] 李怡然, 张 姝, 肖先勇, 等. V2G 模式下计及供需两侧需求的电动汽车充放电调度策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(3): 129-135, 143. LI Yiran, ZHANG Shu, XIAO Xianyong, et al. Charging and discharging scheduling strategy of EVs considering demands of supply side and demand side under V2G mode[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(3): 129-135, 143.

[18] 刘永梅, 王金丽, 杨红磊, 等. 计及柔性负荷调节能力的有源配电网动态优化方法[J]. 高电压技术, 2021, 47(1): 73-80. LIU Yongmei, WANG Jinli, YANG Honglei, et al. Dynamic optimization method for active distribution networks considering flexible load regulation capability[J]. High Voltage Technology, 2021, 47(1): 73-80.

[19] 龙雪梅, 杨 军, 吴赋章, 等. 考虑路网-电网交互和用户心理的电动汽车充电负荷预测[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(14): 86-93. LONG Xuemei, YANG Jun, WU Fuzhang, et al. Electric vehicle charging load forecasting considering road network-grid interaction and user psychology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(14): 86-93.

[20] JI W L, YU K, CHEN X Y, et al. Research on pricing strategy of EV charging load agent in residential areas considering peak-shifting and valley-filling[C] // 2019 IEEE 3rd Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). Changsha, China: IEEE, 2019: 677-682.

[21] 卢 慧, 谢开贵, 邵常政, 等. 考虑燃油车和电动汽车动态混合交通流的电动汽车充电站规划[J]. 高电压技术, 2023, 49(3): 1150-1160. LU Hui, XIE Kaigui, SHAO Changzheng, et al. Planning of electric vehicle charging stations considering dynamic hybrid traffic flow of fuel and electric vehicles[J]. High Voltage Technology, 2023, 49(3): 1150-1160.

[22] XING Q, CHEN Z, ZHANG Z Q, et al. Charging demand forecasting model for electric vehicles based on online ride-hailing trip data[J]. IEEE Access, 2019, 7: 137390-137409.

[23] 刘敦楠, 王玲湘, 汪伟业, 等. 基于深度强化学习的大规模电动汽车充换电负荷优化调度[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(4): 36-46. LIU Dunnan, WANG Lingxiang, WANG Weiye, et al. Optimal scheduling of electric vehicle load for large-scale battery charging and swapping based on deep reinforcement learning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(4): 36-46.

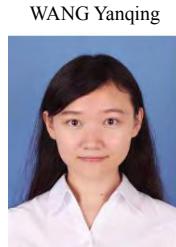


王岩庆

1998—, 男, 硕士

主要从事电动汽车电能调度等方面的研究工作

E-mail: 2505047233@qq.com



WANG Yanqiang

黄一诺(通信作者)

1988—, 女, 博士, 讲师

主要从事电力系统分析与控制、电动汽车电能调度等方面的研究工作

E-mail: ynkly@163.com



HUANG Yinuo

Ph.D.

Corresponding author