

考虑用户出行成本预算的电力-交通耦合网络充电站定价策略

谢龙韬, 谢仕炜, 陈铠悦, 张亚超, 陈之栋

(福州大学电气工程与自动化学院, 福建省福州市 350108)

摘要: 随着电动汽车的规模化发展,研究如何有效考虑用户的出行行为机理并制定合理的充电站充电价格,对电力-交通网络的协同优化调度具有重大意义。针对此问题,提出了考虑用户出行成本预算的电力-交通耦合网络充电站定价策略。首先,建立考虑出行成本预算的交通用户均衡模型,将均衡状态通过变分不等式进行等效描述,从而对电动汽车出行需求和充电行为进行刻画。其次,构建考虑功率削减的配电网二阶锥优化模型,将充电站定价问题转化为含有变分不等式约束的优化问题,并根据问题设计交替迭代算法和外梯度算法进行求解。最后,通过算例对所提模型和方法的有效性进行验证,结果表明了考虑出行成本预算对耦合网络充电定价的必要性。

关键词: 电动汽车; 电力-交通耦合网络; 变分不等式; 出行成本预算; 交通用户均衡; 充电站定价

0 引言

随着中国新能源汽车发展战略的实施,电动汽车销售数量从2020年的136.7万辆增加到2022年的688.7万辆,占到了汽车市场销售总量的25%以上^[1-2]。为适应电动汽车规模化发展趋势,国务院办公厅发布的《关于进一步构建高质量充电基础设施体系的指导意见》^[3]中指出,中国将于2030年基本建成覆盖广泛、规模适度、结构合理、功能完善的高质量充电基础设施体系,来支撑电动汽车行业的发展,有效满足电动汽车用户的出行充电需求。随着电动汽车大规模普及,充电负荷的大量并网对电网的经济性、稳定性以及电能质量等方面都造成了严重的影响^[4]。电动汽车充电站作为提供充电服务的设施载体,通过制定充电站充电价格,能对电动汽车的充电行为进行调控,从而实现负荷的有序充电,提高电网的经济性,其将对未来构建高质量充电基础设施体系起到关键作用^[5]。

为制定有效的充电价格策略,需要关注电力-交通网络中的充电负荷分布情况。目前,电力交通领域已有不少文献对电力网与交通网融合的网络负荷分布特性进行了研究^[6]。文献^[7]表明网络的用户均衡状态能够有效描述电力-交通耦合网络的流量状态分布。文献^[8]进一步将用户均衡问题转化为变分不等式问题,为求解电力-交通耦合网络用户均

衡状态提供了有效的解决方案。

基于上述对于电力-交通耦合网络中用户充电行为的分析,对于充电站定价问题,文献^[9]以无线充电技术为背景,研究了电网经济运行情况下的能源价格制定方法。文献^[10]考虑存在一个独立的系统管理者,建立双层充电价格优化模型,通过电力网和交通网的协同运行,实现系统的最优运行。文献^[11]以充电站运营商利益最大化为目标,提出了电动汽车充电站的定价机制。文献^[12]为实现耦合网络资源的有效利用,提出了一种电动汽车充电价格补贴的方法。文献^[13]从全局决策者的角度,以系统最优运行目标,提出了电力-交通耦合网络的协同定价策略。文献^[14]进一步考虑了混合需求不确定性,提出了电力-交通耦合网络的定价策略。文献^[15]考虑了多个充电站运营商竞价的情况,建立了充电站定价非合作博弈模型。文献^[16]通过变分不等式对网络的用户均衡状态进行描述,通过不动点映射的方法获得充电站充电定价方案。

上述研究通常是从价格制定者的角度出发,分析定价问题的有效性。然而,当前充电定价策略相关研究中,通常是将用户的出行需求视作常数,少有考虑到实际用户需求和行为对价格策略造成的影响。实际中,交通网出行用户具有一定心理预期,当交通拥堵、充电成本升高等因素导致出行实际成本大于用户预期的出行成本时,用户出行意愿可能发生变化,从而改变网络整体的出行充电需求。显然,忽略用户出行行为和出行需求变化前提下的定价策略将不符合实际情况,导致定价策略的有效性较低^[5-16]。

收稿日期: 2023-06-28; 修回日期: 2023-08-03。

上网日期: 2024-01-04。

国家自然科学基金青年基金资助项目(52307087)。

此外,现有研究对于电力-交通耦合网络充电站的定价问题,所构建模型通常存在非凸非线性约束^[15-16],传统的优化方法难以适用^[14]。

基于现有研究所存在的不足,本文提出了一种考虑用户出行成本预算(travel cost budget, TCB)的充电站定价模型。首先,建立了考虑用户出行成本预算的电力-交通耦合网络充电站定价模型,利用交通网用户均衡与变分不等式的等价性,将定价问题等效为一类含有变分不等式约束的优化问题(optimization problem with variational inequality constraint, OPVIC)。其次,利用模型变量的可分离性,设计了一种交替迭代算法对等效问题进行求解。最后,采用56节点配电网和28节点交通网进行仿真,验证了问题建模与算法求解的有效性。

1 含电动汽车的交通网络建模

本文采用有向图 $G_T(\mathcal{N}_T, \mathcal{A})$ 来表示含电动汽车充电站的交通网络拓扑结构。其中, \mathcal{N}_T 为交通网的节点集合,充电站的节点集合记为 $\mathcal{N}_{CS} \subset \mathcal{N}_T$, $\mathcal{A} = \mathcal{A}^e \cup \mathcal{A}^g$ 为交通网的路段集合, \mathcal{A}^e 为充电路段集合, \mathcal{A}^g 为通用路段集合。

考虑交通网络中所有用户从源节点出发前往终点,其中电动汽车用户需经过一个充电站进行充电。为描述上述静态交通网络的车流量分布,本文进行了如下定义:将存在出行需求的用户按是否存在充电需求进行划分,将有充电需求的电动汽车归为电动汽车用户,记作用户 $e \in \mathcal{E}$,将无充电需求的电动汽车以及非电动汽车归为非电动汽车用户,记作用户 $g \in \mathcal{G}$,令交通网所有类型用户集合为 $\mathcal{U} = \{\mathcal{E}, \mathcal{G}\}$;而对应用户的出行需求起点-终点(origin-destination, O-D)对集合记为 $(i, j) \in \mathcal{W}^u = \mathcal{W}^e \cup \mathcal{W}^g$ (代表用户从节点 i 去往节点 j),其中, \mathcal{W}^u 、 \mathcal{W}^e 、 \mathcal{W}^g 分别为用户 u 、 e 、 g 的需求 O-D 对集合;用户相应需求 O-D 对 w 的可选择出行路径集合记作 \mathcal{K}^w 。

1.1 考虑用户出行成本预算的交通流模型

在实际的城市交通网中,用户出行的需求很大程度受到出行所需成本的影响。当交通路况受到车流量影响而产生拥堵时,用户个体的出行成本也随之升高;考虑对于部分受出行成本影响的出行需求,当出行成本高于用户所能接受的最大预算时,用户将改变或放弃出行计划,进而使得交通网整体的出行需求产生改变。为了有效刻画上述现象,本节引入用户出行成本预算的概念,即通过出行成本预算来反映用户出行成本对于出行计划的影响^[17],从而为实际用户的出行提供参考。出行成本预算的具体定义如下:

定义1:交通网络中任意需求 O-D 对 w 之间,用

户 u 能够容忍的最大出行成本为用户出行成本预算,记作 $C_{u,w}$ 。

根据定义1可知,出行成本预算 $C_{u,w}$ 反映了用户最高所能接受的出行成本,即当用户 u 在需求 O-D 对 w 之间的所有行驶路径中最小的出行成本 $c_{u,w,\min}$ 超过 $C_{u,w}$ 时,用户则放弃出行计划。

为方便建模,考虑在有向图 $G_T(\mathcal{N}_T, \mathcal{A})$ 的基础上进行拓展,定义包含虚拟路径的交通网络为 $G_T(\mathcal{N}_T, \mathcal{A} \cup \mathcal{Z})$,其中, $\mathcal{Z} = \mathcal{Z}^e \cup \mathcal{Z}^g$ 表示虚拟路径的集合, \mathcal{Z}^e 为用户 e 的虚拟路径集合, \mathcal{Z}^g 为用户 g 的虚拟路径集合。同时,在不失模型有效性的前提下,对模型进行简化处理,将交通网络中所有用户出行视为受出行成本预算影响的变化需求。在所有需求 O-D 对之间建立一条虚拟的通行路径以表征出行成本预算的影响机理,具体示意图如图1所示。

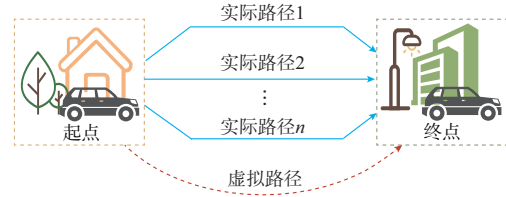


图1 含虚拟路径的交通网
Fig. 1 Transportation network with virtual paths

定义用户 u 在需求 O-D 对 w 之间虚拟路径上的流量为 $H_{u,w}$,其大小与用户 u 在需求 O-D 对 w 之间选择不出行的用户数量相对应,虚拟路径流量越大,意味着选择不出行的用户数量越多。根据文献[17],出行成本预算 $C_{u,w}$ 可通过下述美国联邦公路局(Bureau of Public Road, BPR)函数进行表示:

$$C_{u,w} = \omega_0 T_{u,w} \left[1 + 0.15 \left(\frac{H_{u,w}}{y_{u,w}} \right)^4 \right] \quad \forall w \in \mathcal{W}^u, u \in \mathcal{U} \quad (1)$$

式中: ω_0 为用户出行时间的成本折算系数; $T_{u,w}$ 和 $y_{u,w}$ 分别为用户 u 关于需求 O-D 对 w 的出行时间预算和虚拟路径容量参数。

从式(1)可以看出,用户对应需求 O-D 对的不出行数量越多,用户的出行成本预算越高。 $y_{u,w}$ 较小的情况下,用户的出行预算受不出行用户数量影响显著;反之,则不显著。而用户的出行时间预算 $T_{u,w}$ 大小由用户需求 O-D 对距离的远近所决定,同时,由于用户 e 存在充电需求,其出行预算中应涵盖充电费用, $T_{u,w}$ 表达式为:

$$T_{u,w} = \begin{cases} \frac{\kappa}{|\mathcal{K}^w|} \sum_{k \in \mathcal{K}^w} \delta_{a,k}^e t_a^0 + \frac{\lambda_{CS} E_B}{\omega_0} & \forall w \in \mathcal{W}^e \\ \frac{\kappa}{|\mathcal{K}^w|} \sum_{k \in \mathcal{K}^w} \delta_{a,k}^g t_a^0 & \forall w \in \mathcal{W}^g \end{cases} \quad (2)$$

式中: κ 为修正系数; $|\mathcal{K}^w|$ 为路径集合 \mathcal{K}^w 的总段数; t_a^0 为无车流情况下自由行驶路段 a 所花费的时间; λ_{CS} 为无车流量情况下充电站的充电价格; E_B 为用户的固定充电量; $\delta_{a,k}^e$ 和 $\delta_{a,k}^g$ 为路段 a 与实际路径 k 的关联矩阵元素。用户 e 的可行路径 k 经过路段 a 则有 $\delta_{a,k}^e=1$;反之, $\delta_{a,k}^e=0$ 。用户 g 同理。

基于上述框架,建立考虑用户出行成本预算的交通流数学模型如下。

1) 路段行驶时间函数

$$t_a(x_a) = \begin{cases} t_a^0 \left[1 + 0.15 \left(\frac{x_a}{y_a} \right)^4 \right] & \forall a \in \mathcal{A}^r \\ t_a^0 \left[1 + \mathcal{R} \left(\frac{x_a}{y_n - x_a} \right) \right] & \forall a \in \mathcal{A}^c \end{cases} \quad (3)$$

式中: $t_a(x_a)$ 为通行路段 a 所花费的时间; x_a 为路段 a 的车流量; y_a 为路段 a 的容量; \mathcal{R} 为函数的形状参数; y_n 为充电站 n 的极限容量。

2) 路段流量

$$x_a = \sum_{w \in \mathcal{W}^r} \sum_{k \in \mathcal{K}^w} \delta_{a,k}^e h_{e,k} + \sum_{w \in \mathcal{W}^g} \sum_{k \in \mathcal{K}^w} \delta_{a,k}^g h_{g,k} \quad \forall a \in \mathcal{A} \quad (4)$$

式中: $h_{e,k}$ 和 $h_{g,k}$ 分别为用户 e 和 g 选择可行路径 k 的车流量。

3) 流量等式约束

$$\sum_{k \in \mathcal{K}^w} h_{u,k} + H_{u,w} = q_{u,w} \quad \forall w \in \mathcal{W}^u, u \in \mathcal{U} \quad (5)$$

$$\begin{cases} h_{u,k} \geq 0 & \forall k \in \mathcal{K}^w, u \in \mathcal{U} \\ H_{u,w} \geq 0 & \forall w \in \mathcal{W}^u, u \in \mathcal{U} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $h_{u,k} \in \{h_{e,k}, h_{g,k}\}$; $q_{u,w}$ 为用户 u 关于需求O-D对 w 的总出行需求。

4) 个体出行成本函数

$$c_a(x_a) = \begin{cases} w_0 t_a(x_a) & \forall a \in \mathcal{A}^r \\ w_0 t_a(x_a) + E_B \gamma_{a,n} \lambda_n & \forall a \in \mathcal{A}^c \end{cases} \quad (7)$$

$$c_{u,k} = \sum_{a \in \mathcal{A}} c_a(x_a) \delta_{a,k}^u \quad \forall k \in \mathcal{K}^w, \forall w \in \mathcal{W}^u, u \in \mathcal{U} \quad (8)$$

式中: $c_a(x_a)$ 为通行路段 a 所需成本; $\gamma_{a,n}$ 为路段 a 与充电站 n 的耦合关系系数($\gamma_{a,n}=1$ 代表路段 a 经过充电站 n ,反之不经过); λ_n 为充电站 n 的充电价格; $c_{u,k}$ 为用户 u 选择路径 k 所需要的总出行成本。

式(3)为一般路段和充电路段所需的时间成本函数,分别用BPR函数以及排队充电函数进行描述;式(4)为路段流量和路径流量之间的关系;式(5)表示出行用户和不出行用户数量总和应等于用户总出行需求量;式(6)表示所有路段的流量必须非负;式(7)和式(8)描述了用户实际出行成本同交通网流

量之间的函数关系。

1.2 考虑出行成本预算的静态用户均衡描述

根据Wardrop原理,交通网中用户以自身出发成本最低选择出行方案,网络最终将达到用户均衡的状态^[8]。在用户均衡状态下,任意需求对之间的所有被使用路径的行驶费用相等,且为所有路径中的行驶费用最小值。需指出,对于需求对之间虚拟路径中的用户而言,同样满足用户均衡的原则。综上,含电动汽车的交通用户均衡状态可通过如下逻辑关系式进行描述:

$$c_{u,k} = c_{u,w,\min} \quad h_{u,k} > 0, \forall k \in \mathcal{K}^w, w \in \mathcal{W}^u, u \in \mathcal{U} \quad (9)$$

$$c_{u,k} \geq c_{u,w,\min} \quad h_{u,k} = 0, \forall k \in \mathcal{K}^w, w \in \mathcal{W}^u, u \in \mathcal{U} \quad (10)$$

$$C_{u,w} = c_{u,w,\min} \quad H_{u,w} > 0, \forall w \in \mathcal{W}^u, u \in \mathcal{U} \quad (11)$$

$$C_{u,w} \geq c_{u,w,\min} \quad H_{u,w} = 0, \forall w \in \mathcal{W}^u, u \in \mathcal{U} \quad (12)$$

式(9)和式(10)表示用户将选择成本最小的路径出行,且用户无法通过改变此时的出行路径来减少自身的出行费用;式(11)和式(12)代表当实际最小出行费用等于出行成本预算时,用户会选择虚拟路径(即采取不出行策略),进而体现用户出行成本预算对于实际网络静态用户均衡的影响。为了方便建模求解,将上述逻辑表达式等价如下非线性互补约束:

$$h_{u,k} (c_{u,k} - c_{u,w,\min}) = 0 \quad \forall k \in \mathcal{K}^w, w \in \mathcal{W}^u, u \in \mathcal{U} \quad (13)$$

$$c_{u,k} - c_{u,w,\min} \geq 0 \quad \forall k \in \mathcal{K}^w, w \in \mathcal{W}^u, u \in \mathcal{U} \quad (14)$$

$$H_{u,w} (C_{u,w} - c_{u,w,\min}) = 0 \quad \forall w \in \mathcal{W}^u, u \in \mathcal{U} \quad (15)$$

$$C_{u,w} - c_{u,w,\min} \geq 0 \quad \forall w \in \mathcal{W}^u, u \in \mathcal{U} \quad (16)$$

对于式(13)和式(14),当第 k 条路径的出行流量大于0时,则该条路径 k 的出行费用与最小出行费用相等,而路径 k 的用户流量等于0时,路径 k 的成本一定大于或等于最小出行费用,符合用户均衡的定义;式(15)和式(16)则说明网络的最小出行成本不得超过用户的出行成本预算,当虚拟路径流量大于0时,实际出行成本等于用户出行成本预算,结果符合上述逻辑表达式。

然而,非线性互补约束难以直接求解,通常的解法是引入二进制变量进行松弛^[7],但这一方法并不适合于大规模均衡问题的求解。鉴于变分不等式与非线性互补约束有着良好的等价性,处理过程无须引入整数变量,故将非线性互补约束式(13)一式(16)转化为变分不等式问题^[13]:

$$(H - H^*)^T F(H^*, \lambda) \geq 0 \quad \forall H \in \Omega_T \quad (17)$$

式中: $H = [h_{u,k}, H_{u,w}]^T$ 为实际路段以及虚拟路段的

用户出行车流分布; $F(H^*, \lambda) = [c_{u,k}, C_{u,w}]^T$ 为用户的出行成本以及出行成本预算; λ 为用户出行的充电价格; H^* 代表最终用户均衡状态下的用户出行车流分布; $\Omega_T = \{H \mid DH = Q, H \in \mathbb{R}^+\}$ 为用户出行车流分布 H 的可行域集合, 其中, D 和 Q 为常系数矩阵, \mathbb{R}^+ 为正实数域。

2 含充电负荷的配电网模型

为描述辐射状配电网模型, 可通过有向图 $G_E(\mathcal{N}, \mathcal{L})$ 进行表示, 其中 \mathcal{L} 为线路的集合, \mathcal{N} 为配电网节点集合。考虑到电力网与交通网通过电动汽车充电站节点进行耦合, 且充电站节点集合 \mathcal{N}_{CS} 属于电力网节点, 即 $\mathcal{N}_{CS} \subset \mathcal{N}$, 交通流量 x_a 与充电负荷 p_n^{CS} 之间存在的线性映射关系可表示为如下等式约束:

$$p_n^{CS} = \sum_{a \in \mathcal{A}^c} \gamma_{a,n} E_B x_a \quad \forall n \in \mathcal{N}_{CS} \quad (18)$$

配电网各个节点的负荷功率 p_n^D 可表示为:

$$p_n^D = \begin{cases} \bar{p}_n^D & \forall n \in \{\mathcal{N}_+ / \mathcal{N}_{CS}\} \\ \bar{p}_n^D + p_n^{CS} & \forall n \in \mathcal{N}_{CS} \end{cases} \quad (19)$$

式中: \bar{p}_n^D 为节点 n 的固定负荷; \mathcal{N}_+ 为除平衡节点外的其余配电网节点。

为了满足发电要求, 配电网的任意节点须满足功率潮流平衡的等式约束:

$$p_n^G - (p_n^D - \Delta p_n^D) = \sum_{v \in \Theta(n)} p_{l,nv} - (p_{l,mn} - \tilde{I}_{mn} R_{l,mn}) \quad \forall (m, n) \in l \in \mathcal{L}, \forall n \in \mathcal{N}_+ \quad (20)$$

$$q_n^G - (q_n^D - \Delta q_n^D) = \sum_{v \in \Theta(n)} q_{l,nv} - (q_{l,mn} - \tilde{I}_{mn} X_{l,mn}) \quad \forall (m, n) \in l \in \mathcal{L}, \forall n \in \mathcal{N}_+ \quad (21)$$

式中: p_n^G, q_n^G 分别为节点 n 注入的有功功率和无功功率; $\Delta p_n^D, \Delta q_n^D$ 分别为节点 n 负荷有功功率和无功功率的削减量; $\Theta(n)$ 表示以 n 为首节点的所有线路的末节点的集合; $p_{l,nv}, q_{l,nv}$ 分别为以 n 为首节点、 v 为末节点的线路 l 上流过的有功功率和无功功率 ($p_{l,mn}, q_{l,mn}$ 同理); $R_{l,mn}, X_{l,mn}$ 分别为线路 l 的电阻、电抗; q_n^D 为节点 n 处的无功功率负荷; \tilde{I}_{mn} 为节点 m 和节点 n 之间线路电流幅值的平方。

对于辐射状配电网的任意线路两点之间的电压降约束, 可通过下列等式进行描述:

$$\tilde{U}_n = \tilde{U}_m - 2(p_{l,mn} R_{l,mn} + q_{l,mn} X_{l,mn}) + (Z_{l,mn})^2 \quad \forall (m, n) \in l \in \mathcal{L} \quad (22)$$

式中: \tilde{U}_n, \tilde{U}_m 分别为节点 n 和节点 m 电压幅值的平方; $Z_{l,mn}$ 为线路 l 的阻抗。

线路功率、电压以及电流三者之间的关系为含二次线性项的等式约束, 为了方便求解处理, 将原来

的等式约束松弛为二阶锥不等式约束:

$$\| [2p_{l,mn} \quad 2q_{l,mn} \quad \tilde{I}_{mn} - \tilde{U}_m] \|_2^T \leq \tilde{I}_{mn} + \tilde{U}_m \quad \forall (m, n) \in l \in \mathcal{L} \quad (23)$$

考虑到电网的安全稳定运行、电能质量要求以及配电网发电机组的发电能力, 配电网的相关变量还需满足以下约束条件:

$$\begin{cases} 0 \leq \tilde{I}_{mn} \leq \bar{I}^2 & \forall (m, n) \in \mathcal{L} \\ \underline{U}^2 \leq \tilde{U}_m \leq \bar{U}^2 & \forall m \in \mathcal{N}_+ \end{cases} \quad (24)$$

$$\begin{cases} 0 \leq p_{l,mn} \leq \bar{p}_l & \forall (m, n) \in l \in \mathcal{L} \\ 0 \leq q_{l,mn} \leq \bar{q}_l & \forall (m, n) \in l \in \mathcal{L} \end{cases} \quad (25)$$

$$\begin{cases} \underline{p}_n^G \leq p_n^G \leq \bar{p}_n^G & \forall n \in \mathcal{N}_+ \\ \underline{q}_n^G \leq q_n^G \leq \bar{q}_n^G & \forall n \in \mathcal{N}_+ \end{cases} \quad (26)$$

$$\begin{cases} 0 \leq \Delta p_n^D \leq M_n & \forall n \in \mathcal{N}_+ \\ 0 \leq \Delta q_n^D \leq M_n & \forall n \in \mathcal{N}_+ \end{cases} \quad (27)$$

式中: \bar{I}^2 为线路电流幅值平方的上限; $\bar{U}^2, \underline{U}^2$ 分别为节点电压幅值平方的上、下限; \bar{p}_l, \bar{q}_l 分别为线路 l 的最大传输有功功率和无功功率; $\bar{p}_n^G, \underline{p}_n^G$ 和 $\bar{q}_n^G, \underline{q}_n^G$ 分别为节点发电机组的有功出力 and 无功出力的上、下限; M_n 为负荷功率削减上限。

最终, 含充电负荷的配电网最优潮流整体模型可表述为如下优化问题:

$$\begin{cases} \min \left\{ F_p = \sum_{n \in \mathcal{N}_+} [\alpha_n (p_n^G)^2 + \beta_n p_n^G] + \right. \\ \left. \beta_0 p_0^G + \pi \sum_{n \in \mathcal{N}_+} (\Delta p_n^D + \Delta q_n^D) \right\} \\ \text{s.t. 式(18)—式(27)} \end{cases} \quad (28)$$

式中: $\alpha_n, \beta_n, \beta_0$ 均为发电成本系数; p_0^G 为平衡节点注入的有功功率; π 为功率削减惩罚系数。

在配电网中, 一般采用节点边际价格 (locational marginal price, LMP) 作为充电站售电价格^[6,14], 其等价于有功平衡方程式(20)的拉格朗日对偶变量 λ 。

为了方便说明, 将二阶锥松弛后的最优潮流模型写为如下矩阵形式:

$$\begin{cases} \min \{ F_p = X^T A X + B^T X \} \\ \Omega_p = \{ (\lambda, X) \mid \Gamma X = E H, \Lambda X \leq \xi, \\ \| \Phi X + \phi \|_2 \leq G^T X + \tau, \lambda = K X \} \end{cases} \quad (29)$$

式中: $A, B, \Gamma, E, \Lambda, \Phi, G, K$ 均为常系数矩阵; ξ, ϕ, τ 为常数向量; $X = [p_n^G, q_n^G, \Delta p_n^D, \Delta q_n^D]$ 为决策变量, 代表了配电网的发电策略, (λ, X) 构成了电力-交通网络综合定价策略集。

3 充电定价策略的 OPVIC 模型

配电网有功平衡约束中包含电动汽车充电负荷,其由交通用户均衡子问题界定。结合上文,可将充电站充电定价问题写成如下紧凑形式:

$$\begin{cases} \min \{ F_p = X^T A X + B^T X \} \\ \text{s.t. } (\lambda, X) \in \Omega_p(H^*) \\ (H - H^*)^T F(H^*, \lambda) \geq 0 \quad \forall H \in \Omega_T \end{cases} \quad (30)$$

上述问题是 OPVIC^[18-19],该问题存在非凸非线性约束,难以通过一般求解器进行求解。为此,本文采用变量分离的思想,将电网的发电定价策略 (λ, X) 和用户车流分布 H 分为两组变量。在电网充电价格 λ 以及发电策略给定的情况下,将问题式(30)转化为关于变量 H 的变分不等式问题进行求解;在用户车流分布 H 给定情况下,问题为带有二阶锥不等式约束的优化问题,可通过一般求解器进行求解。故针对上述 OPVIC,本章设计如下交替迭代算法进行求解。

1) 算法 1: OPVIC 交替迭代算法

步骤 1: 初始化。设置电网发电定价策略 $(\lambda^{(0)}, X^{(0)})$,记录迭代次数 $d=0$ 并开始迭代。

步骤 2: 求解考虑出行成本预算的交通网用户均衡问题。在给定电网发电定价策略 $(\lambda^{(d)}, X^{(d)})$ 的情况下,通过算法 2 求解变分不等式 $VI\{F(H, \lambda^{(d)}), \Omega_T\}$,输出求得的用户车流分布 $H^{(d+1)}$ 。

步骤 3: 获得充电站最优充电定价策略。在给定交通网用户车流分布 $H^{(d+1)}$ 的情况下,根据节点充电负荷需求 p_n^{CS} ,求解配电网最优潮流问题,输出充电站电价 $\lambda^{(d+1)}$ 。

步骤 4: 判断是否收敛。若满足收敛条件 $\|[(\lambda^{(d+1)} - \lambda^{(d)}), (H^{(d+1)} - H^{(d)})]\|_2 \leq \epsilon_1$ (其中 ϵ_1 为算法 1 的迭代收敛误差),输出解 $(\lambda^*, X^*) = (\lambda^{(d+1)}, X^{(d+1)})$, $H^* = H^{(d+1)}$;否则,返回步骤 2。

考虑到实际求解电力-交通网络充电站定价问题中,存在交通用户出行时间横跨多个电力系统调度周期的情况,可根据跨越的调度周期,对充电负荷的时空分布进行划分。然后,执行算法步骤 3,输出对应调度周期内的各个充电站的最优充电价格,将充电价格提供给对应时段下途经该充电站进行充电的用户。通过上述改进方案,便可解决实际运用中用户出行横跨多个电网调度周期的问题。限于本文篇幅和侧重点,仅从理论上对方案的有效性进行说明。

由于优化问题所涉及变量均为连续变量且有界,根据布劳威尔不动点定理^[20]可知,算法 1 具有收敛性,且存在至少一个解。

需指出,步骤 2 在电网定价策略给定的情况下

求解考虑出行成本预算的交通网用户均衡问题,其涉及了变分不等式问题式(17)的计算。根据文献[21],采用如下外梯度算法求解变分不等式问题,可获得交通网络的有效均衡解。

2) 算法 2: 外梯度算法

步骤 1: 选定初始迭代点 $H^{(0)} \in \Omega_T$,选择每次迭代步长 $0 < \alpha < 1$,记初始迭代次数 $\eta = 0$ 。

步骤 2: 根据充电站给出的充电价格 $\lambda^{(d+1)}$,计算此时的 $F(H^{(\eta)})$,获得在可行域 Ω_T 上的预测投影点 $\tilde{H}^{(\eta)} = P_{\Omega_T}[H^{(\eta)} - \alpha F(H^{(\eta)})]$ 。

步骤 3: 计算预测投影点 $\tilde{H}^{(\eta)}$ 处的 $F(\tilde{H}^{(\eta)})$,通过进一步在可行域 Ω_T 上投影,获得下次迭代更新解 $H^{(\eta+1)} = P_{\Omega_T}[H^{(\eta)} - \alpha F(\tilde{H}^{(\eta)})]$ 。

步骤 4: 判断是否满足迭代收敛条件 $\|H^{(\eta+1)} - H^{(\eta)}\|_2 \leq \epsilon_2$ (ϵ_2 为算法 2 的迭代收敛误差)。若满足,输出此时的 $H^{(\eta+1)}$ 作为交通网用户均衡问题的解,令 $H^* = H^{(\eta+1)}$,返回算法 1;若不满足,则返回步骤 2。

需指出的是,算法 1 和算法 2 中的 ϵ_1 和 ϵ_2 均为算法的迭代收敛误差; $P_{\Omega_T}(H^{(\eta)}) = \arg \min_{H \in \Omega_T} \|H - H^{(\eta)}\|_2^2$,代表在可行域 Ω_T 中进行投影,寻找最靠近 $H^{(\eta)}$ 的解。通过选取合适的迭代步长 α ,使得外梯度函数 $F(H)$ 在可行域 Ω_T 满足 Lipschitz 连续时,算法具有收敛性,即 $\alpha \|F(H^{(\eta+1)}) - F(H^{(\eta)})\| \leq L \|H^{(\eta+1)} - H^{(\eta)}\|$,其中, L 为常数,满足 $0 < L < 1$ 。

4 算例分析

4.1 算例介绍

本文采用 SCE 56 节点的配电网与 TN 28 节点的交通网作为测试算例,对电网充电站充电定价策略的有效性进行分析,其结构如图 2 所示。模型中涉及的仿真所需参数和仿真结果均已共享。仿真求解流程基于 MALTAB+YALMIP 平台,算法中涉及的优化问题均通过调用 Gurobi 求解器进行求解。

4.2 求解分析

为验证算法 1 求解 OPVIC 的有效性,图 3 给出了算法求解的误差收敛曲线图。从图 3 可知,OPVIC 交替迭代算法在迭代至 5 次时,迭代误差 ϵ_1 满足了 1×10^{-5} 的收敛要求;但由于路段流量持续变化,充电站价格发生了较大的变化波动。直到 12 次迭代后,迭代误差 ϵ_1 降低至 1×10^{-5} 以下,在之后迭代过程中,误差无明显变化。因此,在算法迭代至 12 次后,电力-交通耦合网络达到了用户均衡状态,此时充电站充电价格为最优定价策略。

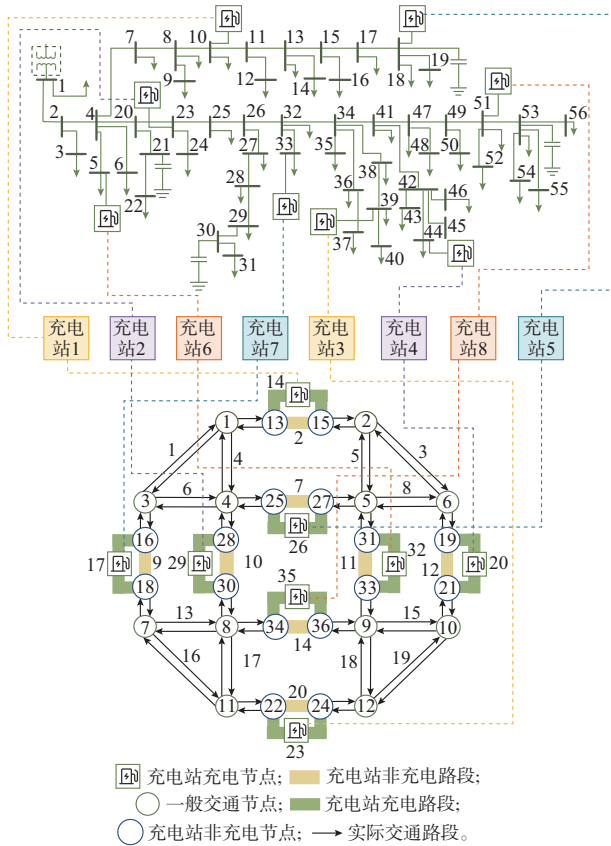


图2 电力-交通耦合网络测试算例
Fig. 2 Test case of power-transportation coupling network

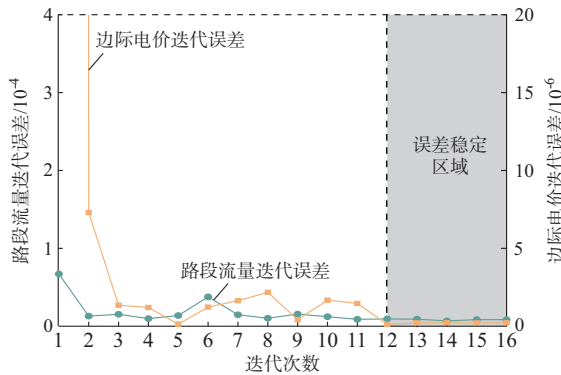


图3 交替迭代算法误差曲线
Fig. 3 Error curves of alternating iteration algorithm

为测试外梯度算法能否对变分不等式问题进行有效求解,图4给出了交替迭代算法第1次迭代时外梯度算法的误差曲线图。从图4的迭代结果中可以看出,算法2(内层)第1次迭代时间最长,收敛时间需300 s(误差降低至 10^{-5} 以下),而后续迭代时间迅速降低,到达第3次时,算法收敛只花费了3.34 s,并在之后迭代时间无较大变化。出现上述结果的主要原因是一开始的初始迭代点 $H^{(0)}$ 相距最优解

$H^*(\lambda^{(0)})$ 较远,因而搜寻当前最优解所需的时间较长;而后续外梯度算法选取上一次迭代所求得解 $H^*(\lambda^{(d)})$ 作为初始点,迭代前后充电站价格策略 $\lambda^{(d)} \rightarrow \lambda^{(d+1)}$ 的变化较小。因此,初始迭代点 $H^*(\lambda^{(d)})$ 与此时最优解 $H^*(\lambda^{(d+1)})$ 的距离较近,从而使得算法能够在较短的时间内收敛。综上所述,外梯度算法的求解效率与选取初始迭代点和最优解之间的距离有关。通过选取合适的初始迭代点,外梯度算法能够在合理的时间内对变分不等式问题进行有效求解。

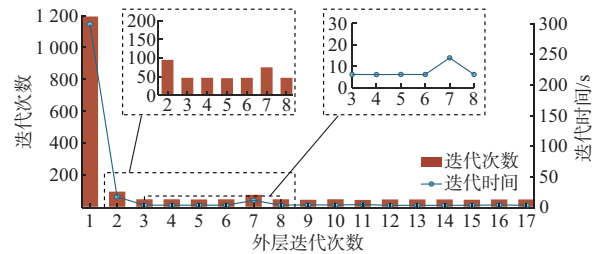


图4 外梯度算法迭代误差曲线
Fig. 4 Iteration error curve of external gradient algorithm

4.3 仿真结果分析

为验证交通网是否达到用户均衡状态,图5给出了不同类型用户的部分需求O-D对的路径流量以及对应的出行成本,并将实际出行成本与预算绘制折线进行对比。图中:黄色代表实际路径流量及对应出行成本,绿色为虚拟路径流量以及出行成本预算。仿真结果表明,流量不为0路径的出行成本为所有可行路径中的最小值,并与用户出行成本预算相等;而对于出行成本不为最小值的路径,路段流量均为0。仿真结果符合1.2节所定义的考虑用户出行成本预算的交通网用户均衡状态。

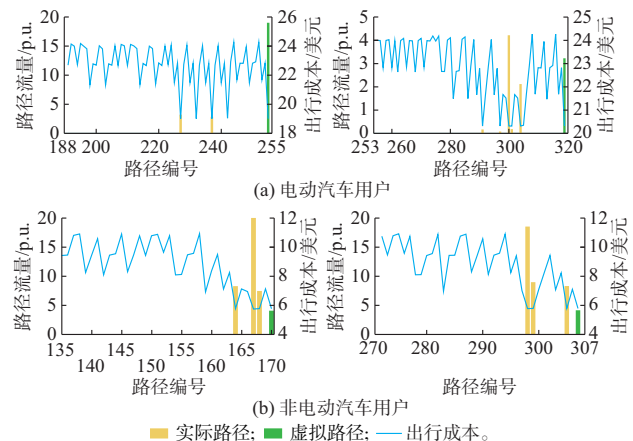


图5 部分需求O-D对路径流量与出行成本分布
Fig. 5 Distribution of path traffic flow and travel costs for some demand O-D pairs

为体现出行成本预算对于交通网络用户均衡状态的影响,本文选取不同的修正系数 $\kappa = 0.8 \sim 1.0$, 对用户出行时间预算 $T_{u,w}$ 进行修正,并给出不同出行成本预算下的电力-交通网络实际出行需求数量对比结果,如图6所示。

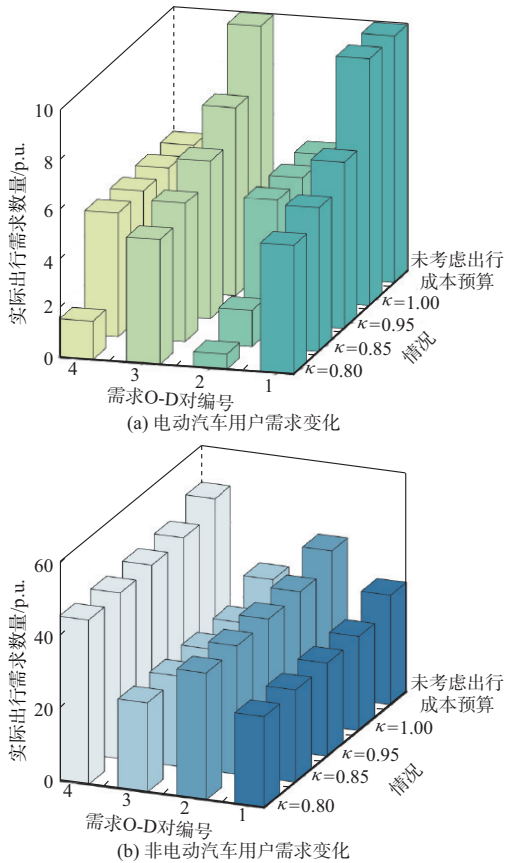


图6 不同修正系数下的实际出行需求数量对比
Fig. 6 Comparison of actual traveling demand numbers with different correction factors

由图6(a)和(b)的结果可知:1)当预算成本较大时($\kappa = 1.00$ 时),考虑出行成本预算与未考虑出行成本预算方案的出行需求数量相同;2)在预算成本较小的情况下,随 κ 的减少,电动汽车用户部分需求O-D对的出行需求显著降低,而非电动汽车用户的出行需求降低均不明显。该现象的主要原因是电动汽车用户存在额外充电成本,使得出行成本远大于非电动汽车用户,用户预算低的情况下,交通的拥堵更容易使得电动汽车用户选择不出行。上述结果表明,电动汽车和非电动汽车用户的实际出行数量均受出行成本预算的大小影响,且出行需求大致与预算成本成正比。因此,合理估计用户的出行成本预算能够更有效预测交通网中的用户实际出行需求量,进而预测各个充电站的充电负荷,对充电站定价具有重要意义。

表1给出了各个充电站在不同修正系数 κ 下的

充电价格。其中,未考虑出行成本预算方案的充电价格高于考虑出行成本预算方案。修正系数 κ 越小,充电站的充电价格则越高。该现象主要原因为考虑出行成本预算后,出行需求有所减少,充电站的充电负荷低于未考虑出行成本预算的情况,充电价格相对降低。通过考虑出行成本预算,能够更好地对充电站的实际充电负荷进行预测,从而使得充电站能够在确保配电网经济稳定运行的同时,提供更高的充电价格,满足出行用户的充电需求。

表1 充电价格对比
Table 1 Comparison of charging prices

充电站	充电价格/[美元/(MW·h)]				未考虑出行成本预算
	$\kappa=0.80$	$\kappa=0.85$	$\kappa=0.95$	$\kappa=1.00$	
1	75.250 4	75.294 8	75.325 7	75.374 8	75.399 6
2	75.274 5	75.326 9	75.362 6	75.418 4	75.443 5
3	75.156 8	75.245 5	75.304 3	75.390 6	75.416 1
4	75.342 0	75.389 2	75.421 0	75.470 2	75.495 5
5	75.376 7	75.422 0	75.455 1	75.503 4	75.529 5
6	75.312 8	75.355 2	75.386 2	75.433 1	75.457 3
7	75.335 4	75.381 1	75.413 8	75.461 2	75.486 2
8	75.440 4	75.486 4	75.519 3	75.567 4	75.592 8

4.4 灵敏度分析

本文所考虑的用户出行成本预算的函数表达式中,修正系数 κ 和虚拟路径容量参数 $y_{u,w}$ 分别反映了用户的出行意愿和需求受出行数量的影响程度。为分析参数对于模型结果的影响程度,仿真采用不同的模型参数,对充电站充电定价问题进行求解。

图7给出了不同参数下,充电站充电价格的变化规律。从结果中可以看出,修正系数 κ 越大,虚拟路径容量参数越小,则充电站的电价越大。其中,电价受到修正系数 κ 的影响较为显著。 $\kappa = 0.85 \sim 0.95$ 的范围内,修正系数 κ 与电价呈近似线性正相关的关系,而后修正系数超过0.95后,充电站电价的上升速率减缓,这是由于在 $\kappa = 0.95 \sim 1.0$ 情况下,用户拥有充足的出行成本预算,使得实际出行需求与充电站负荷的变化不明显,进而导致充电价格没有出现较大波动。相比于修正系数,充电站电价对于不同的虚拟路径容量参数的灵敏度较低。在 $\kappa = 0.8 \sim 0.9$ 的范围内,充电站与虚拟路径容量负相关;而在 $\kappa = 0.9 \sim 1.0$ 时,对于不同的虚拟路径容量,充电站电价基本无变化。其主要原因是出行需求较小时,虚拟路径容量小的情况下,用户拥有更多的出行成本预算,充电需求相比虚拟路径容量大的情况更多,充电价格也因此增加较为明显;当出行需求较大时,虚拟路径流量少,虚拟路径容量的大小对于用户出行成本预算影响相对较弱,充电价格变化不明

显。通过灵敏度分析的结果可以得知:充电站的充电价格受到用户的出行意愿影响较大;在实际路段出行数量少的情况下,充电价格还会受到出行数量的影响,定价策略有所改变。

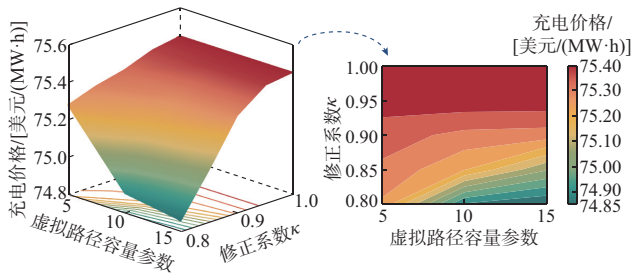


图7 充电站充电价格随不同参数变化规律

Fig. 7 Changing law of charging price of charging station with different parameters

5 结语

本文充分考虑用户出行成本预算对出行决策的影响,建立了考虑用户出行成本预算的电力-交通耦合网络充电站充电定价模型。相比于传统的电力-交通网络定价模型,本文充分考虑用户出行成本预算对充电定价策略的影响,能够更准确地对实际网络中的充电站负荷进行预测。

本文基于变分不等式框架,将充电站定价问题转化归纳为OPVIC,并根据OPVIC的特性,设计OPVIC交替迭代算法以及外梯度算法对问题进行求解。仿真采用56节点配电网和28节点交通网的耦合网络进行测试,仿真结果表明所提交替迭代算法能够对系统级别的耦合网络中充电站定价问题进行快速求解。同时,仿真设置了多个方案进行结果对比,发现考虑出行成本预算的定价方案相较于传统模型方案,能够为用户提供更低的充电价格,降低用户充电成本。最后,通过不同参数下的仿真结果可知,用户出行成本预算对于充电价格的制定结果影响显著,验证了考虑用户出行成本预算对充电站定价的必要性。

未来的工作将基于本文所提的考虑用户出行成本预算的充电定价策略,研究用户出行需求随时间变化的动态响应。引入微分变分不等式,结合本文所提算法,对时域空间下的动态电力交通网用户均衡模型进行分析,求解获得电力-交通耦合网络中充电站的实时动态定价策略,进而更为精确地调控充电负荷分布,进一步提高电网经济性。

本文算例仿真相关参数和仿真结果已共享,可在本刊网站支撑数据处下载(<http://www.aeps-info.com/aeps/article/abstract/20230628010>)。

参考文献

- [1] 钱涛,任孟极,邵成成,等.基于深度学习考虑出行模式的电动汽车充电负荷场景生成[J].电力系统自动化,2022,46(12): 67-75.
QIAN Tao, REN Mengji, SHAO Chengcheng, et al. Deep-learning-based electric vehicle charging load scenario generation considering travel mode [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(12): 67-75.
- [2] 胡泽春,邵成成,何方,等.电网与交通网耦合的设施规划与运行优化研究综述及展望[J].电力系统自动化,2022,46(12): 3-19.
HU Zechun, SHAO Chengcheng, HE Fang, et al. Review and prospect of research on facility planning and optimal operation for coupled power and transportation networks [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(12): 3-19.
- [3] 国务院办公厅.关于进一步构建高质量充电基础设施体系的指导意见[EB/OL].(2023-06-08)[2023-06-25].https://www.gov.cn/zhengce/content/202306/content_6887167.htm.
General Office of the State Council. Guiding opinions on further building a high-quality charging infrastructure system [EB/OL]. (2023-06-08)[2023-06-25]. https://www.gov.cn/zhengce/content/202306/content_6887167.htm.
- [4] 苏粟,李玉璟,夏明超,等.基于时空耦合特性的充电站运行状态预测[J].电力系统自动化,2022,46(3):23-32.
SU Su, LI Yujing, XIA Mingchao, et al. Operation state prediction of charging station based on spatio-temporal coupling characteristics [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(3): 23-32.
- [5] 王一飞,王秀丽,黄晶,等.动态电价机制下电动汽车竞争性充电的阻塞管理模型[J].电力系统自动化,2023,47(12):103-110.
WANG Yifei, WANG Xiuli, HUANG Jing, et al. Congestion management model for competitive charging of electric vehicles under dynamic electricity price mechanism [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(12): 103-110.
- [6] WEI W, MEI S W, WU L, et al. Optimal traffic-power flow in urban electrified transportation networks [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(1): 84-95.
- [7] 邵成成,李徐亮,钱涛,等.基于交通均衡的电动汽车快速充电负荷模拟[J].中国电机工程学报,2021,41(4):1368-1376.
SHAO Chengcheng, LI Xuliang, QIAN Tao, et al. Simulation of EV fast charging load based on traffic equilibrium [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(4): 1368-1376.
- [8] 谢仕炜,林伟伟,张亚超.基于变分不等式理论的电力-交通耦合网络均衡状态研究[J].中国电机工程学报,2022,42(17):6220-6239.
XIE Shiwei, LIN Weiwei, ZHANG Yachao. Research on coupled power-transportation network equilibrium state based on variational inequality theory [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(17): 6220-6239.
- [9] HE F, YIN Y F, ZHOU J. Integrated pricing of roads and electricity enabled by wireless power transfer [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2013, 34: 1-15.
- [10] 刘俊勇,向月,姚昊天,等.三网融合下充电服务网规划与运营探讨[J].电力系统保护与控制,2019,47(12):1-12.
LIU Junyong, XIANG Yue, YAO Haotian, et al. Discussion on planning and operation of charging service network integrated with power and transportation networks [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12): 1-12.

- [11] CUI Y, HU Z C, DUAN X Y. Optimal pricing of public electric vehicle charging stations considering operations of coupled transportation and power systems [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(4): 3278-3288.
- [12] LV S, CHEN S, WEI Z N. Coordinating urban power-traffic networks: a subsidy-based Nash-Stackelberg-Nash game model [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2023, 19(2): 1778-1790.
- [13] XIE S W, WU Q W, HATZIARGYRIOU N D, et al. Collaborative pricing in a power-transportation coupled network: a variational inequality approach [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(1): 783-795.
- [14] 谢仕炜,张亚超,舒胜文,等.考虑混合需求不确定性的电力-交通耦合网络最优定价策略[J/OL].中国电机工程学报:1-13 [2023-06-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20220831.1711.011.html>.
XIE Shiwei, ZHANG Yachao, SHU Shengwen, et al. The optimal pricing strategies of power-traffic coupled networks considering mixed demand uncertainties[J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-13 [2023-06-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20220831.1711.011.html>.
- [15] 陈吕鹏,潘振宁,余涛,等.基于动态非合作博弈的大规模电动汽车实时优化调度[J].电力系统自动化,2019,43(24):32-40.
CHEN Lüpeng, PAN Zhenning, YU Tao, et al. Real-time optimal dispatch for large-scale electric vehicles based on dynamic non-cooperative game theory [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(24): 32-40.
- [16] 谢仕炜,胡志坚,王珏莹.考虑时-空耦合的城市电力-交通网络动态流量均衡[J].中国电机工程学报,2021,41(24):8408-8424.
XIE Shiwei, HU Zhijian, WANG Jueying. Dynamic flow equilibrium of urban power and transportation networks considering the coupling in time and space [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(24): 8408-8424.
- [17] DI Z, YANG L X, QI J G, et al. Transportation network design for maximizing flow-based accessibility [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2018, 110: 209-238.
- [18] OUTRATA J V. On optimization problems with variational inequality constraints [J]. SIAM Journal on Optimization, 1994, 4(2): 340-357.
- [19] KAUSHIK H D, YOUSEFIAN F. A method with convergence rates for optimization problems with variational inequality constraints [J]. SIAM Journal on Optimization, 2021, 31(3): 2171-2198.
- [20] GRANAS A, DUGUNDJI J. Fixed point theory [M]. New York, USA: Springer, 2003.
- [21] 何炳生.求解单调变分不等式的一类预测-校正方法的统一框架[J].南京大学学报(自然科学),2003,39(4):451-459.
HE Bingsheng. A uniform framework of a class of prediction-correction methods for monotone variational inequalities [J]. Journal of Nanjing University (Natural Science), 2003, 39(4): 451-459.

谢龙韬(2000—),男,硕士研究生,主要研究方向:电力-交通融合系统。E-mail:220120068@fzu.edu.cn

谢仕炜(1993—),男,通信作者,博士,副研究员,主要研究方向:电力-交通融合系统。E-mail:shiwei_xie@126.com

陈铠悦(2003—),女,硕士研究生,主要研究方向:电力-交通融合系统。E-mail:ChenKaiyue_0522@foxmail.com

(编辑 蔡静雯)

Pricing Strategy of Charging Station in Power-Transportation Coupling Network Considering User Travel Cost Budget

XIE Longtao, XIE Shiwei, CHEN Kaiyue, ZHANG Yachao, CHEN Zhidong

(School of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: With the large-scale development of electric vehicles, it is of great significance to study how to effectively consider the traveling behavior mechanism of users and formulate rational charging prices for charging stations for the collaborative optimization and scheduling of power-transportation coupling networks. To solve this problem, this paper proposes a pricing strategy for charging stations in the power-transportation coupling network considering the user travel cost budget. Firstly, a transportation user equilibrium model considering the travel cost budget is established, and the equilibrium state is equivalently described through variational inequalities, so as to characterize the traveling demands and charging behaviors of electric vehicles. Secondly, a second-order cone optimization model for distribution networks considering power reduction is constructed. The charging station pricing problem has been transformed into an optimization problem with variational inequality constraints, and an alternating iteration algorithm combined with an extra-gradient algorithm is designed to solve the problem. Finally, the effectiveness of the proposed model and methods is verified through a case, and the results show the necessity of considering the travel cost budget for charging pricing in coupling networks.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 52307087).

Key words: electric vehicle (EV); power-transportation coupling network; variational inequalities; travel cost budget; transportation user equilibrium; charging station pricing

