

考虑交通流的柔性互联配电网电动汽车承载能力计算方法

曹佳晨¹, 张沈习¹, 张璐², 刘文亮³, 曹毅⁴, 梁宇⁴

(1. 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室(上海交通大学), 上海市 200240;

2. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京市 100083; 3. 国网福建省电力有限公司厦门供电公司, 福建省厦门市 361000;

4. 南方电网能源发展研究院有限责任公司, 广东省广州市 510663)

摘要: 交通流的时空变化会导致电动汽车充电需求分布发生改变,进而影响配电网电动汽车承载能力。为了精细化考虑交通流的影响,提出了计及交通流的柔性互联配电网(FIDN)电动汽车承载能力计算方法。该方法考虑智能软开关的灵活可调能力,以降低电动汽车规模化接入对配电网的冲击。首先,基于半动态交通流模型,综合考虑多种电动汽车接入模式,建立电动汽车调控模型;其次,计及交通流影响下的电动汽车调控措施,以能够承载的电动汽车数量最大为目标,提出考虑交通流的FIDN电动汽车承载能力计算模型;然后,通过二次凸包络松弛方法、大M法、二阶锥松弛方法等实现模型转化,并提出嵌套收紧松弛算法对模型进行求解,以减小松弛间隙;最后,在改进的标准算例及福建省某实际算例中进行测试分析,验证了所提模型和算法的有效性。

关键词: 柔性互联; 配电网; 电动汽车; 承载能力; 交通流; 嵌套收紧松弛算法; 智能软开关

0 引言

近年来,在政策与市场的驱动下,电动汽车产业得到了高质量发展。中国电动汽车保有量迅速增长,截至2023年底已达1552万辆,同比提升了48.5%。然而,电动汽车规模化无序接入导致配电网承载能力面临严峻挑战^[1-2]。在满足安全运行约束下,配电网允许接入的电动汽车数量最大值为其对电动汽车的承载能力^[3]。融合电力网与交通网信息的电动汽车时空调控能够有效增强配电网对电动汽车接入的适应性,但能量流与交通流的耦合使问题呈现更高维度、更多非凸约束的特征,电动汽车承载能力计算难度加大。电动汽车承载能力的精确测算对保障配电网安全运行、推动电动汽车规模化接入至关重要。因此,有必要研究交通流影响下的配电网电动汽车承载能力计算方法。

目前,已有较多配电网电动汽车承载能力计算方法研究。文献[4]提出了基于综合指标评分的配电网电动汽车承载能力评估方法;文献[5]基于数学解析法,给出了配电网电动汽车最大渗透率与变压器负载率的关系;文献[6-7]基于试探法,计算了配

电网安全运行极限下的电动汽车承载能力。然而,上述文献在评估电动汽车承载能力时未充分挖掘配电网的灵活调控手段。

针对上述问题,已有文献围绕源网荷储环节的调控手段进行配电网电动汽车承载能力计算研究。文献[8]分析了分布式电源(distributed generator, DG)功率与电动汽车充放电功率的可调控性对配电网电动汽车渗透率的影响;文献[9-10]研究了考虑直流改造、无功补偿的配电网电动汽车承载能力计算方法;文献[2,11]研究了计及电动汽车空间/时间可调能力的配电网承载能力评估方法;文献[12]计及储能系统(energy storage system, ESS)与可调节负荷的可控性,提出了涵盖电动汽车等的配电网承载能力两阶段评估模型。

现有研究为配电网电动汽车承载能力的精确评估奠定了良好基础,但尚存以下局限性:1)文献[2, 8, 11]计算配电网电动汽车承载能力时已计及电动汽车时间或空间维度的可调特性,但均假设不受交通流影响,不考虑交通状况调控电动汽车易造成道路拥堵,影响用户参与调控的意愿,实际中电动汽车可能无法按时到达指定充电站,制约了配电网电动汽车承载能力计算结果的准确性;2)文献[2, 4-12]所提方法均应用于放射型拓扑结构的配电网,一定程度上限制了配电网承载的电动汽车规模。含智能软开关(soft open point, SOP)的柔性互联配电网

收稿日期: 2024-06-26; 修回日期: 2024-10-26。

上网日期: 2025-01-21。

国家自然科学基金资助项目(52177099, 51907123); 上海市启明星计划资助项目(23QA1405400)。

(flexible interconnected distribution network, FIDN) 具有广域功率灵活调节的能力,并能够提供无功补偿^[13-18],有助于支撑电动汽车规模化接入。因此,考虑 SOP 灵活可调能力的 FIDN 电动汽车承载能力计算值得进一步研究。

针对现有方法无法适用于电力-交通深入融合与 SOP 广泛接入趋势下的配电网电动汽车承载能力精准评估的应用场景,本文提出计及交通流的 FIDN 电动汽车承载能力计算方法,主要贡献为:1)精细化计及交通流影响与 SOP 的灵活可调能力,提出考虑交通流的 FIDN 电动汽车承载能力计算模型;2)面向高求解精度与低计算时间的需求,提出采用双层迭代框架的嵌套收紧松弛算法以求解松弛后的模型。

1 考虑交通流的电动汽车调控模型

电动汽车接入 FIDN 的模式依赖于车与桩两方面,即电动汽车是否具备充电功率大小/方向可调功能、充电桩是否支持功率可调^[19]。以功率大小与方向是否可调为依据,电动汽车接入模式可分为充电功率不可调、充电功率可调、充放电功率可调 3 种^[20]。本章考虑上述 3 种电动汽车接入模式,基于半动态交通流模型建立计及交通流的电动汽车调控模型。

1.1 半动态交通流模型

根据时间尺度,交通流模型可划分为静态(大于 90 min)、半动态(15~90 min)和动态(小于 15 min) 3 种^[21]。静态交通流模型假设交通流在不同时段间相互独立,适用于交通状况随时间不变或变化缓慢的情况,常用于交通网规划场景;动态交通流模型考虑了短时间尺度的交通流变化,但求解速度较慢,适用于交通状况实时变化的情况,常用于实时导航场景;半动态交通流模型作为前两种模型的折中,能够计及交通流在不同时段间的耦合,兼顾模型的精度与求解效率,适用于交通状况随时间变化明显但变化的时间间隔相对较长的情况,可用于车辆出行引导场景^[22-23]。此外,考虑电动汽车时间或空间可控特性的配电网电动汽车承载能力计算的时间尺度通常为 1 h^[2,8,11]。综上,本文选用半动态交通流模型描述交通网的运行状态,为计及交通流影响下的 FIDN 电动汽车承载能力计算方法研究提供模型基础。涵盖燃油汽车与 3 种接入模式的电动汽车的半动态交通流模型如附录 A 式(A1)一式(A9)所示。

1.2 电动汽车调控模型

电动汽车调控示意图如图 1 所示。电动汽车调控中心获取 FIDN 运行状态及交通网路况信息,根

据 FIDN 与交通网的运行情况向电动汽车发出调控信号^[24],通过价格引导对电动汽车的充电位置进行调控,并对充电功率可调、充放电功率可调电动汽车的充电时间进行调节。为了刻画交通流影响下的电动汽车时空灵活性,在半动态交通流模型的基础上,对电动汽车空间维度的可调特性及充放电行为进行建模。



图 1 电动汽车调控示意图
Fig. 1 Schematic diagram of electric vehicle regulation

半动态交通流模型和电动汽车调控模型通过变量进行耦合,交通流分布与电动汽车充放电行为之间相互影响与制约。一方面,交通流的时空变化反映了交通网的拥堵情况,会影响各充电站在不同时段的电动汽车充、放电价格,进而影响到达不同充电站的电动汽车出行需求,以及各充电站的电动汽车充、放电功率。另一方面,电动汽车充放电功率时空分布会对电动汽车的出行需求产生影响,进而影响电动汽车与燃油汽车各路径流量的分布,改变交通网的交通流分布。

1) 电动汽车充电位置调控模型

通过调整不同时段各充电站的电动汽车充、放电价格,引导电动汽车改变充电位置,改善交通网的交通流分布与 FIDN 的负荷分布,进而提高 FIDN 电动汽车承载能力。电动汽车充、放电价格约束如下:

$$\begin{cases} c_{EV, ch, \min} \leq c_{ch, s, t} \leq c_{EV, ch, \max} & \forall s \in \Omega_{TE}, \forall t \in \Omega_T \\ c_{EV, dis, \min} \leq c_{dis, s, t} \leq c_{EV, dis, \max} & \forall s \in \Omega_{TE}, \forall t \in \Omega_T \end{cases} \quad (1)$$

式中: $c_{EV, ch, \max}$ 和 $c_{EV, ch, \min}$ 分别为 t 时段充电站 s 充电价格 $c_{ch, s, t}$ 的上、下限; $c_{EV, dis, \max}$ 和 $c_{EV, dis, \min}$ 分别为 t 时段充电站 s 放电价格 $c_{dis, s, t}$ 的上、下限; Ω_{TE} 和 Ω_T 分别为交通网中充电站和运行时段集合。

考虑充电位置可调后,起点为 r 、目的地为 s 的

电动汽车起讫点(O-D)对 (r, s) 的出行需求 $q_i^{r,s}$ 修正为:

$$q_i^{r,s} = q_i^{r,s,0} + \sum_{s' \in \Omega_{TE} / \{s\}} (q_i^{r,s',s} - q_i^{r,s,s'}) \quad \forall (r, s) \in \Psi^m, \forall t \in \Omega_T \quad (2)$$

式中: $q_i^{r,s,0}$ 为 t 时段电动汽车O-D对 (r, s) 的原始出行需求; $q_i^{r,s',s}$ 为 t 时段电动汽车由O-D对 (r, s') 转移至 (r, s) 的出行需求; $\Omega_{TE} / \{s\}$ 为交通网中除 s 以外的充电站集合; Ψ^m 为 m 类型电动汽车O-D对集合,其中, $m \in \{e_1, e_2, e_3\}$ 分别表示充电功率不可调、充电功率可调、充放电功率可调接入模式。

对电动汽车的充电位置进行调控时需要考虑用户满意度。仅当 t 时段从充电位置 s' 变到 s 的满意度 $\lambda_t^{r,s',s}$ 超过最低限度 λ_{\min} 时,电动汽车才会响应充电位置调控,如式(3)所示。 $\lambda_t^{r,s',s}$ 通常与充电站间的距离、电动汽车充放电价格、充电等待时间和充电站服务质量等因素相关^[2,25-27]。

$$\begin{cases} q_i^{r,s',s} \geq 0 & \lambda_t^{r,s',s} \geq \lambda_{\min} \\ q_i^{r,s',s} = 0 & \lambda_t^{r,s',s} < \lambda_{\min} \\ \forall (r, s) \in \Psi^m, \forall s' \in \Omega_{TE} / \{s\}, \forall t \in \Omega_T \end{cases} \quad (3)$$

基于M/M/S排队模型, t 时段充电站 s 的电动汽车充电等待时间 $T_{\text{wait},m,s,t}$ 如附录A式(A10)一式(A14)所示。

充电站 s 的服务质量 $Q_{m,s}$ 为电动汽车行驶单位距离所需充电时长^[27],如式(4)所示。

$$Q_{m,s} = \frac{T_{m,s}}{L} \quad \forall s \in \Omega_{TE} \quad (4)$$

式中: $T_{m,s}$ 为 m 类型电动汽车行驶距离为 L 时在充电站 s 所需的充电时长。当 $m = e_1$ 时, $T_{e_1,s}$ 计算方式如式(5)所示;当 $m = e_2$ 或 $m = e_3$ 时, $T_{m,s}$ 则可由充电站历史统计数据获得。

$$T_{e_1,s} = \frac{E_{EV, \text{rated}} \Delta S_{EV, \text{SOC, avg}}^{EV}}{P_{s, \text{EVC, max}} \eta_{EVC, \text{ch}}} \quad \forall s \in \Omega_{TE} \quad (5)$$

式中: $E_{EV, \text{rated}}$ 为单辆电动汽车的额定容量; $\Delta S_{EV, \text{SOC, avg}}^{EV}$ 为电动汽车充电后平均提升的荷电状态值; $P_{s, \text{EVC, max}}$ 为充电站 s 中的充电桩功率; $\eta_{EVC, \text{ch}}$ 为电动汽车充电效率。

充电功率不可调与充电功率可调的电动汽车改变充电位置的满意度 $\lambda_t^{r,s',s}$ 如式(6)所示。

$$\lambda_t^{r,s',s} = \begin{cases} \omega_{11} \frac{c_{\text{ch},s',t} - c_{\text{ch},s,t}}{c'_{\text{ch},t,\text{max}}} + \omega_{12} \frac{d_{m,\text{max}} - d_{s',s}}{d_{m,\text{max}}} + \\ \omega_{13} \frac{T_{\text{wait},m,s',t} - T_{\text{wait},m,s,t}}{T_{\text{wait},m,\text{max}}} + \omega_{14} \frac{Q_{m,s'} - Q_{m,s}}{Q_{m,\text{max}}} \\ d_{s',s} \leq d_{m,\text{max}} \\ 0 \quad d_{s',s} > d_{m,\text{max}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $m \in \{e_1, e_2\}$; $\omega_{11}, \omega_{12}, \omega_{13}, \omega_{14}$ 为权重系数,可通过模糊综合分析法确定^[28]; $c'_{\text{ch},t,\text{max}}$ 和 $Q_{m,\text{max}}$ 分别为 t 时段充电站间的电动汽车充电价格差和充电服务质量差饱和值; $d_{s',s}$ 为充电站 s' 和 s 之间的距离; $d_{m,\text{max}}$ 为电动汽车最大调控距离; $T_{\text{wait},m,\text{max}}$ 为电动汽车最长充电等待时间。由式(6)可知, $\lambda_t^{r,s',s}$ 与 $d_{s',s}$ 、电动汽车充电价格、充电等待时间和充电站服务质量有关。

充放电功率可调电动汽车的 $\lambda_t^{r,s',s}$ 还与充电站间的电动汽车放电价格有关,计算方式如下:

$$\lambda_t^{r,s',s} = \begin{cases} \omega_{21} \frac{c_{\text{ch},s',t} - c_{\text{ch},s,t}}{c'_{\text{ch},t,\text{max}}} + \omega_{22} \frac{c_{\text{dis},s,t} - c_{\text{dis},s',t}}{c'_{\text{dis},t,\text{max}}} + \\ \omega_{23} \frac{d_{e_3,\text{max}} - d_{s',s}}{d_{e_3,\text{max}}} + \omega_{24} \frac{T_{\text{wait},e_3,s',t} - T_{\text{wait},e_3,s,t}}{T_{\text{wait},e_3,\text{max}}} + \\ \omega_{25} \frac{Q_{e_3,s'} - Q_{e_3,s}}{Q_{e_3,\text{max}}} & d_{s',s} \leq d_{e_3,\text{max}} \\ 0 & d_{s',s} > d_{e_3,\text{max}} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\omega_{21}, \omega_{22}, \omega_{23}, \omega_{24}, \omega_{25}$ 为权重系数; $c'_{\text{dis},t,\text{max}}$ 为充电站间的电动汽车放电价格差饱和值。

2) 电动汽车充放电调控模型

电动汽车到达充电站时的荷电状态应在允许范围内,以避免电池快速老化,如式(8)和式(9)所示。

$$S_{k,t}^{EV, \text{SOC, ini}, s} = S_{k,t}^{EV, \text{SOC, ini}, r} - S_{k,t}^{EV, \text{SOC, l}} \sum_{a \in \Omega_R} l_a \delta_{k,a}^{r,s}$$

$$\forall k \in K^{r,s}, \forall (r, s) \in \Psi^m, \forall m \in \{e_1, e_2, e_3\}, \forall t \in \Omega_T \quad (8)$$

$$S_{k,t}^{EV, \text{SOC, ini}, s} \geq S^{EV, \text{SOC, min}} \quad \forall k \in K^{r,s}, \forall (r, s) \in \Psi^m,$$

$$\forall m \in \{e_1, e_2, e_3\}, \forall t \in \Omega_T \quad (9)$$

式中: $S_{k,t}^{EV, \text{SOC, ini}, r}$ 和 $S_{k,t}^{EV, \text{SOC, ini}, s}$ 分别为 t 时段电动汽车在起点 r 和目的地 s 处充电站的荷电状态; $S_{k,t}^{EV, \text{SOC, l}}$ 和 $S^{EV, \text{SOC, min}}$ 分别为电动汽车行驶单位里程降低的荷电状态和允许的最小荷电状态; l_a 为路段 a 的长度; Ω_R 为路段集合; $K^{r,s}$ 为路径集合; $\delta_{k,a}^{r,s}$ 表示路段 a 和路径 k 的从属关系。

充电站中同时充电的电动汽车数量应受限于充电桩数量与存在的电动汽车数量,如式(10)一式(12)所示。其中,式(10)和式(11)的线性化方式见文献[29]。

$$Y_{i,t}^{e_1} = \min \{ \hat{Y}_{i,t}^{e_1}, z_{e_1,i}^{EVC} \} \quad (10)$$

$$\sum_{m \in \{e_2, e_3\}} Y_{i,t}^m = \min \left\{ \sum_{m \in \{e_2, e_3\}} \hat{Y}_{i,t}^m, z_{e_1,i}^{EVC} \right\} \quad (11)$$

$$Y_{i,t}^m \leq \hat{Y}_{i,t}^m \quad \forall m \in \{e_1, e_2, e_3\}, \forall i \in \Omega_{EVC}, \forall t \in \Omega_T \quad (12)$$

式中: Ω_{EVC} 为FIDN充电站集合; $Y_{i,t}^m$ 和 $\hat{Y}_{i,t}^m$ 分别为 t

时段充电站 i 处同时充电和含有的 m 类型电动汽车数量; $z_{e_1, i}^{\text{EVC}}$ 为充电站 i 中的普通充电桩数量; $z_{e_2, i}^{\text{EVC}}$ 、 $z_{e_3, i}^{\text{EVC}}$ 为智能有序充电桩数量。

t 时段充电站 i 处第 1 种接入模式(即充电功率不可调接入模式)的电动汽车充电功率 $P_{i, t}^{\text{EVC}, e_1, \text{ch}}$ 如式(13)、式(14)所示。式(15)用于保证第 1 种接入模式下电动汽车的充电需求均能够满足。

$$P_{i, t}^{\text{EVC}, e_1, \text{ch}} = P_{i, \text{EVC}, \text{max}} Y_{i, t}^{e_1} \quad \forall i \in \Omega_{\text{EVC}}, \forall t \in \Omega_T \quad (13)$$

$$\hat{Y}_{i, t}^{e_1} = \sum_{s \in C(i)} \sum_{(r, s) \in \Psi^r} q_t^{r, s, \text{mod}} \quad \forall i \in \Omega_{\text{EVC}}, \forall t \in \Omega_T \quad (14)$$

$$\sum_{t \in \Omega_T} P_{i, t}^{\text{EVC}, e_1, \text{ch}} \eta_{\text{EVC}, \text{ch}} \Delta t \geq \sum_{t \in \Omega_T} \hat{Y}_{i, t}^{e_1} E_{\text{EV}, \text{rated}} \Delta S^{\text{EV}, \text{SOC}, \text{avg}} \quad (15)$$

式中: $s \in C(i)$ 表示交通网节点 s 与 FIDN 节点 i 耦合; $q_t^{r, s, \text{mod}}$ 为半动态交通流模型中修正后的车辆出行需求; Δt 为时间间隔。

第 2 种接入模式(即充电功率可调接入模式)和第 3 种接入模式(即充放电功率可调接入模式)的电动汽车功率调控模型如式(16)一式(24)所示。其中,式(16)表明充电站 i 含有的 m 类型电动汽车总电量 $E_{i, t}^m$ 由前一时段总电量、电动汽车总充电功率 $P_{i, t}^{\text{EVC}, m, \text{ch}}$ 、放电功率 $P_{i, t}^{\text{EVC}, m, \text{dis}}$ 及到达/离开的电动汽车总电量 $E_{i, t}^{\text{arr}, m}$ 、 $E_{i, t}^{\text{dep}, m}$ 决定;式(17)、式(18)分别给出了 m 类型电动汽车总充、放电功率范围;式(19)表明第 2 种接入模式下电动汽车不可向电网放电;式(20)给出了 $E_{i, t}^m$ 的上下限;式(21)、式(22)分别给出了 $E_{i, t}^{\text{arr}, m}$ 和 $E_{i, t}^{\text{dep}, m}$ 的计算方式;式(23)给出了充电站 i 含有的 m 类型电动汽车数量的计算方式;式(24)表明第 2、3 种接入模式下电动汽车参与功率调控的时长可动态调整。

$$E_{i, t}^m = E_{i, t-\Delta t}^m + \left(P_{i, t-\Delta t}^{\text{EVC}, m, \text{ch}} \eta_{\text{EVC}, \text{ch}} - \frac{P_{i, t-\Delta t}^{\text{EVC}, m, \text{dis}}}{\eta_{\text{EVC}, \text{dis}}} \right) \Delta t + E_{i, t}^{\text{arr}, m} - E_{i, t}^{\text{dep}, m} \quad \forall i \in \Omega_{\text{EVC}}, \forall m \in \{e_2, e_3\}, \forall t \in \Omega_T \quad (16)$$

$$0 \leq P_{i, t}^{\text{EVC}, m, \text{ch}} \leq \gamma_{i, t}^{\text{EVC}, m} Y_{i, t}^m P_{i, \text{EVC}, \text{max}} \quad \forall i \in \Omega_{\text{EVC}}, \forall m \in \{e_2, e_3\}, \forall t \in \Omega_T \quad (17)$$

$$0 \leq P_{i, t}^{\text{EVC}, m, \text{dis}} \leq (1 - \gamma_{i, t}^{\text{EVC}, m}) Y_{i, t}^m P_{i, \text{EVC}, \text{max}} \quad \forall i \in \Omega_{\text{EVC}}, \forall m \in \{e_2, e_3\}, \forall t \in \Omega_T \quad (18)$$

$$\gamma_{i, t}^{\text{EVC}, e_2} = 1 \quad \forall i \in \Omega_{\text{EVC}}, \forall t \in \Omega_T \quad (19)$$

$$S^{\text{EV}, \text{SOC}, \text{min}} \hat{Y}_{i, t}^m E_{\text{EV}, \text{rated}} \leq E_{i, t}^m \leq S^{\text{EV}, \text{SOC}, \text{max}} \hat{Y}_{i, t}^m E_{\text{EV}, \text{rated}} \quad \forall i \in \Omega_{\text{EVC}}, \forall m \in \{e_2, e_3\}, \forall t \in \Omega_T \quad (20)$$

$$E_{i, t}^{\text{arr}, m} = E_{\text{EV}, \text{rated}} \sum_{s \in C(i)} \sum_{(r, s) \in \Psi^m} \sum_{k \in K^{r, s}} S_{k, t}^{\text{EV}, \text{SOC}, \text{ini}, s} f_{k, t}^{r, s} \quad \forall i \in \Omega_{\text{EVC}}, \forall m \in \{e_2, e_3\}, \forall t \in \Omega_T \quad (21)$$

$$E_{i, t}^{\text{dep}, m} = S^{\text{EV}, \text{SOC}, \text{exp}} \sum_{\tau_m \in \Omega_{\tau_m}} \sum_{s \in C(i)} \sum_{(r, s) \in \Psi^m} \sum_{k \in K^{r, s}} f_{k, t-\tau_m, \tau_m}^{r, s} E_{\text{EV}, \text{rated}} \quad \forall i \in \Omega_{\text{EVC}}, \forall m \in \{e_2, e_3\}, \forall t \in \Omega_T \quad (22)$$

$$\hat{Y}_{i, t}^m = \sum_{\tau_m \in \Omega_{\tau_m}} \sum_{\tau = t - \tau_m + 1}^t \sum_{s \in C(i)} \sum_{(r, s) \in \Psi^m} \sum_{k \in K^{r, s}} f_{k, \tau, \tau_m}^{r, s} \quad \forall i \in \Omega_{\text{EVC}}, \forall m \in \{e_2, e_3\}, \forall t \in \Omega_T \quad (23)$$

$$f_{k, t}^{r, s} = \sum_{\tau_m \in \Omega_{\tau_m}} f_{k, t, \tau_m}^{r, s} \quad \forall k \in K^{r, s}, \forall (r, s) \in \Psi^m, \quad \forall m \in \{e_2, e_3\}, \forall t \in \Omega_T \quad (24)$$

式中: $\eta_{\text{EVC}, \text{dis}}$ 为电动汽车放电效率; $\gamma_{i, t}^{\text{EVC}, m}$ 为 m 类型电动汽车的充/放电状态,取值为 1 表示处于充电状态,取值为 0 表示处于放电状态; $S^{\text{EV}, \text{SOC}, \text{max}}$ 和 $S^{\text{EV}, \text{SOC}, \text{exp}}$ 分别为电动汽车最大、期望荷电状态; Ω_{τ_m} 为电动汽车参与充(放)电功率调控的时长集合; $f_{k, t}^{r, s}$ 为 t 时段路径 k 参与充(放)电功率调控的电动汽车数量; $f_{k, t, \tau_m}^{r, s}$ 为 t 时段路径 k 参与充(放)电功率且调控时长为 τ_m 的电动汽车数量。

2 计及交通流的 FIDN 电动汽车承载能力计算模型

在上述考虑交通流的电动汽车调控模型的基础上,本章进一步提出交通流影响下 FIDN 电动汽车承载能力计算模型。该模型在计及电力网-交通网耦合特性的同时,考虑 SOP 功率调节等调控手段。

2.1 目标函数

该模型以 FIDN 能够承载的 3 种接入模式的电动汽车总数量最大为目标,决策变量为 FIDN 能够接纳的从各起点至各充电站充电的电动汽车数量 $q_t^{r, s}$,如式(25)所示。

$$\max \sum_{t \in \Omega_T} \sum_{m \in \{e_1, e_2, e_3\}} \sum_{(r, s) \in \Psi^m} q_t^{r, s} \quad (25)$$

2.2 约束条件

1) 电动汽车调控约束

电动汽车调控约束如式(1)一式(24)、附录 A 式(A1)一式(A14)所示。

2) 运行成本上限约束

FIDN 综合运行成本 C^{OPE} 包括购电成本 C^{PU} 和网损成本 C^{loss} ,如式(26)一式(28)所示。为了保证 FIDN 运行的经济性, C^{OPE} 不可超过其上限 $C_{\text{max}}^{\text{OPE}}$,如式(29)所示。

$$C^{\text{PU}} = \sum_{t \in \Omega_T} \sum_{b \in \Omega_b} c_{b, t}^{\text{PU}} P_{b, t}^{\text{S}} + \sum_{t \in \Omega_T} \sum_{g \in \Omega_{\text{DG}}} c_{g, t}^{\text{DG}, \text{OM}} P_{g, t}^{\text{PDG}} \quad (26)$$

$$C^{\text{loss}} = \sum_{t \in \Omega_T} \sum_{ij \in \Omega_{li}} c_{b, t}^{\text{PU}} l_{ij, t} R_{ij} \quad (27)$$

$$C^{\text{OPE}} = C^{\text{PU}} + C^{\text{loss}} \quad (28)$$

$$C^{\text{OPE}} \leq C_{\text{max}}^{\text{OPE}} \quad (29)$$

式中： Ω_S 、 Ω_{DG} 和 Ω_L 分别为变电站节点、DG 节点、线路集合； $c_{b,t}^{PU}$ 和 $c_{g,t}^{DG,OM}$ 分别为 t 时段变电站 b 向上级电网购电的单位电量价格和向 DG 购电的单位电量价格； $P_{b,t}^S$ 和 $P_{g,t}^{DG}$ 分别为 t 时段变电站 b 、DG 输出的有功功率； $l_{ij,t}$ 为 t 时段线路 ij 电流的平方； R_{ij} 为线路 ij 的电阻值。

3) 变电站节点功率约束

$$P_{b,t}^{S,\min} \leq P_{b,t}^S \leq P_{b,t}^{S,\max} \quad \forall b \in \Omega_S, \forall t \in \Omega_T \quad (30)$$

$$Q_{b,t}^{S,\min} \leq Q_{b,t}^S \leq Q_{b,t}^{S,\max} \quad \forall b \in \Omega_S, \forall t \in \Omega_T \quad (31)$$

式中： $P_{b,t}^{S,\max}$ 和 $P_{b,t}^{S,\min}$ 分别为变电站输出有功功率的上、下限； $Q_{b,t}^S$ 为 t 时段变电站 b 输出的无功功率； $Q_{b,t}^{S,\max}$ 和 $Q_{b,t}^{S,\min}$ 分别为变电站输出无功功率的上、下限。

4) 有载调压变压器调约束

$$v_{b,t} = (1 + k_{b,t} \Delta V)^2 V_{b,t}^2 \quad \forall b \in \Omega_S, \forall t \in \Omega_T \quad (32)$$

$$K_{\min} \leq k_{b,t} \leq K_{\max} \quad \forall b \in \Omega_S, \forall t \in \Omega_T \quad (33)$$

式中： $v_{b,t}$ 为 t 时段节点 b 电压幅值的平方； $k_{b,t}$ 为 t 时段节点 b 有载调压变压器抽头位置； K_{\max} 和 K_{\min} 分别为有载调压变压器抽头位置的上、下限； ΔV 为有载调压变压器抽头每调节一档改变的电压值； $V_{b,t}$ 为节点 b 有载调压变压器的额定电压值。

5) 节点电压约束

$$V_{i,\min} \leq v_{i,t} \leq V_{i,\max} \quad \forall i \in \Omega_N, \forall t \in \Omega_T \quad (34)$$

式中： Ω_N 为 FIDN 节点集合； $V_{i,\max}$ 和 $V_{i,\min}$ 分别为 t 时段节点 i 电压幅值的上、下限。

6) 线路电流约束

$$0 \leq l_{ij,t} \leq I_{ij,\max}^2 \quad \forall ij \in \Omega_L, \forall t \in \Omega_T \quad (35)$$

式中： $I_{ij,\max}$ 为 t 时段线路 ij 电流幅值的上限。

7) FIDN 潮流约束

$$\sum_{j \in \kappa(i)} P_{ij,t} - \sum_{k \in \rho(i)} (P_{ki,t} - R_{ki} l_{ki,t}) = P_{i,t}^{\text{inj}} \quad \forall i \in \Omega_N, \forall t \in \Omega_T \quad (36)$$

$$\sum_{j \in \kappa(i)} Q_{ij,t} - \sum_{k \in \rho(i)} (Q_{ki,t} - X_{ki} l_{ki,t}) = Q_{i,t}^{\text{inj}} \quad \forall i \in \Omega_N, \forall t \in \Omega_T \quad (37)$$

$$v_{i,t} - v_{j,t} = 2(R_{ij} P_{ij,t} + X_{ij} Q_{ij,t}) - (R_{ij}^2 + X_{ij}^2) l_{ij,t} \quad \forall ij \in \Omega_L, \forall t \in \Omega_T \quad (38)$$

$$l_{ij,t} v_{i,t} - P_{ij,t}^2 - Q_{ij,t}^2 = 0 \quad \forall ij \in \Omega_L, \forall t \in \Omega_T \quad (39)$$

$$P_{i,t}^{\text{inj}} = P_{i,t}^S - \sum_{m \in \{e_1, e_2, e_3\}} P_{i,t}^{\text{EVC}, m, \text{ch}} + P_{i,t}^{\text{EVC}, e_3, \text{dis}} + P_{i,t}^{\text{DG}} - P_{i,t}^{\text{ESS}, \text{ch}} + P_{i,t}^{\text{ESS}, \text{dis}} - P_{i,t}^N + P_{i,t}^{\text{SOP}} \quad \forall i \in \Omega_N, \forall t \in \Omega_T \quad (40)$$

$$Q_{i,t}^{\text{inj}} = Q_{i,t}^S + Q_{i,t}^{\text{DG}} + Q_{i,t}^{\text{SVC}} - Q_{i,t}^N + Q_{i,t}^{\text{SOP}} \quad \forall i \in \Omega_N, \forall t \in \Omega_T \quad (41)$$

式中： $\kappa(i)$ 和 $\rho(i)$ 分别为节点 i 的子节点和父节点集合； $P_{ij,t}$ 和 $Q_{ij,t}$ 分别为 t 时段流过线路 ij 的有功、无功功率； $P_{i,t}^{\text{inj}}$ 和 $Q_{i,t}^{\text{inj}}$ 分别为 t 时段注入节点 i 的有功、无功功率； X_{ij} 为线路 ij 的电抗值； $P_{i,t}^{\text{DG}}$ 和 $Q_{i,t}^{\text{DG}}$ 分别为 t 时段节点 i 处 DG 输出的有功、无功功率； $P_{i,t}^{\text{ESS}, \text{ch}}$ 和 $P_{i,t}^{\text{ESS}, \text{dis}}$ 分别为 t 时段节点 i 处 ESS 的充、放电功率； $P_{i,t}^N$ 和 $Q_{i,t}^N$ 分别为 t 时段节点 i 的负荷有功、无功功率； $P_{i,t}^{\text{SOP}}$ 和 $Q_{i,t}^{\text{SOP}}$ 分别为 t 时段节点 i 处 SOP 输出的有功、无功功率； $Q_{i,t}^{\text{SVC}}$ 为 t 时段节点 i 处静止无功补偿装置 (static var compensator, SVC) 输出的无功功率。

8) DG 运行约束

$$P_{g,t}^{\text{DG}} = \mu_{g,t}^{\text{DG}} P_g^{\text{DG}} \quad \forall g \in \Omega_{\text{DG}}, \forall t \in \Omega_T \quad (42)$$

$$P_{g,t}^{\text{DG}} \tan \varphi_{g,\min}^{\text{DG}} \leq Q_{g,t}^{\text{DG}} \leq P_{g,t}^{\text{DG}} \tan \varphi_{g,\max}^{\text{DG}} \quad \forall g \in \Omega_{\text{DG}}, \forall t \in \Omega_T \quad (43)$$

式中： P_g^{DG} 和 Q_g^{DG} 分别为 DG 的容量和 t 时段 DG 输出的无功功率； $\mu_{g,t}^{\text{DG}}$ 为 DG 的出力系数； $\varphi_{g,\max}^{\text{DG}}$ 和 $\varphi_{g,\min}^{\text{DG}}$ 分别为 DG 功率因数角的上、下限。

9) SVC 运行约束

$$Q_{v,\min}^{\text{SVC}} \leq Q_{v,t}^{\text{SVC}} \leq Q_{v,\max}^{\text{SVC}} \quad \forall v \in \Omega_{\text{SVC}}, \forall t \in \Omega_T \quad (44)$$

式中： Ω_{SVC} 为 SVC 节点集合； $Q_{v,\max}^{\text{SVC}}$ 、 $Q_{v,\min}^{\text{SVC}}$ 分别为 t 时段 SVC v 输出无功功率 $Q_{v,t}^{\text{SVC}}$ 的上、下限。

10) ESS 运行约束

$$0 \leq P_{e,t}^{\text{ESS}, \text{ch}} \leq \gamma_{e,t}^{\text{ESS}} P_e^{\text{ESS}} \quad \forall e \in \Omega_{\text{ESS}}, \forall t \in \Omega_T \quad (45)$$

$$0 \leq P_{e,t}^{\text{ESS}, \text{dis}} \leq (1 - \gamma_{e,t}^{\text{ESS}}) P_e^{\text{ESS}} \quad \forall e \in \Omega_{\text{ESS}}, \forall t \in \Omega_T \quad (46)$$

$$E_{e,t}^{\text{ESS}} = E_{e,t-\Delta t}^{\text{ESS}} + \left(\eta_{\text{ESS}, \text{ch}} P_{e,t-\Delta t}^{\text{ESS}, \text{ch}} - \frac{P_{e,t-\Delta t}^{\text{ESS}, \text{dis}}}{\eta_{\text{ESS}, \text{dis}}} \right) \Delta t \quad \forall e \in \Omega_{\text{ESS}}, \forall t \in \Omega_T \quad (47)$$

$$E_{e,t_0}^{\text{ESS}} = E_{e,T}^{\text{ESS}} + \left(\eta_{\text{ESS}, \text{ch}} P_{e,T}^{\text{ESS}, \text{ch}} - \frac{P_{e,T}^{\text{ESS}, \text{dis}}}{\eta_{\text{ESS}, \text{dis}}} \right) \Delta t \quad \forall e \in \Omega_{\text{ESS}} \quad (48)$$

$$S_{e,t}^{\text{ESS}, \text{SOC}, \min} E_e^{\text{ESS}} \leq E_{e,t}^{\text{ESS}} \leq S_{e,t}^{\text{ESS}, \text{SOC}, \max} E_e^{\text{ESS}} \quad \forall e \in \Omega_{\text{ESS}}, \forall t \in \Omega_T \quad (49)$$

$$E_{e,t_0}^{\text{ESS}} = S_{e,t_0}^{\text{ESS}, \text{SOC}, \text{ini}} E_e^{\text{ESS}} \quad \forall e \in \Omega_{\text{ESS}} \quad (50)$$

式中： Ω_{ESS} 为 ESS 节点集合； $\gamma_{e,t}^{\text{ESS}}$ 表示 t 时段 ESS e 的充放电状态； P_e^{ESS} 和 E_e^{ESS} 分别为 ESS e 的安装功率和容量； $E_{e,t}^{\text{ESS}}$ 为 t 时段 ESS e 的电量； $\eta_{\text{ESS}, \text{ch}}$ 和 $\eta_{\text{ESS}, \text{dis}}$ 分别为 ESS 的充、放电效率； $S_{e,t}^{\text{ESS}, \text{SOC}, \max}$ 和 $S_{e,t}^{\text{ESS}, \text{SOC}, \min}$ 分别为 ESS 荷电状态的上、下限； $S_{e,t_0}^{\text{ESS}, \text{SOC}, \text{ini}}$ 为 ESS 的初始荷电状态； t_0 和 T 分别为初始运行时段和总运行时段。

11) SOP 运行约束

$$P_{p,t}^{\text{SOP}} + P_{o,t}^{\text{SOP}} + P_{p,t}^{\text{SOP,L}} + P_{o,t}^{\text{SOP,L}} = 0 \quad \forall t \in \Omega_T \quad (51)$$

$$(P_{p,t}^{\text{SOP}})^2 + (Q_{p,t}^{\text{SOP}})^2 \leq (S_p^{\text{SOP}})^2 \quad \forall p \in \Omega_{\text{SOP}}, \forall t \in \Omega_T \quad (52)$$

$$-Q_p^{\text{SOP}} \leq Q_{p,t}^{\text{SOP}} \leq Q_p^{\text{SOP}} \quad \forall p \in \Omega_{\text{SOP}}, \forall t \in \Omega_T \quad (53)$$

式中: Ω_{SOP} 为 SOP 节点集合; $P_{p,t}^{\text{SOP,L}}$ 为 t 时段节点 p 处 SOP 的损耗值; S_p^{SOP} 为节点 p 处 SOP 的容量; Q_p^{SOP} 为节点 p 处 SOP 输出的无功功率上限。

3 模型转化与求解

由于上述计及交通流的 FIDN 电动汽车承载能力计算模型包含路段通行时间计算公式、交通余流计算公式、电动汽车充电位置调控约束、第 3 种接入模式下电动汽车充放电功率约束、线路首端功率约束等非凸约束,难以直接采用 Gurobi 等商业求解器进行有效求解。因此,通过大 M 法、二次凸包络松弛方法、二阶锥松弛方法等对原模型中的非凸非线性项进行转化。然而,对原模型进行二次凸包络松弛与二阶锥松弛会引入松弛间隙,导致求解结果精度降低。为有效降低松弛间隙,本文提出嵌套收紧松弛算法用于求解模型。

3.1 模型转化

1) 大 M 法

基于大 M 法的模型转化过程如附录 A 式 (A15) 一式 (A17) 所示。

2) 二次凸包络松弛方法

针对路段通行时间计算公式存在四次方项的问题,基于二次凸包络松弛方法,引入辅助变量 $\omega_{a,t}^x$ 与 $\omega_{a,t}^{x^2}$ 代替 $x_{a,t}^4$ 与 $x_{a,t}^2$,则 $\omega_{a,t}^x$ 与 $\omega_{a,t}^{x^2}$ 应满足^[21]:

$$x_{a,t}^2 \leq \omega_{a,t}^{x^2} \leq (x_{a,t,\min} + x_{a,t,\max}) x_{a,t} - x_{a,t,\min} x_{a,t,\max} \quad \forall a \in \Omega_R, \forall t \in \Omega_T \quad (54)$$

$$(\omega_{a,t}^{x^2})^2 \leq \omega_{a,t}^x \leq (x_{a,t,\min}^2 + x_{a,t,\max}^2) \omega_{a,t}^{x^2} - x_{a,t,\min}^2 x_{a,t,\max}^2 \quad \forall a \in \Omega_R, \forall t \in \Omega_T \quad (55)$$

式中: $x_{a,t,\max}$ 和 $x_{a,t,\min}$ 分别为 t 时段路段 a 交通流量 $x_{a,t}$ 的上、下限。

附录 A 式 (A2) 中存在连续变量相乘的双线性项 $f_{k,t}^{r,s} t_{k,t}^{r,s}$,通过二次凸包络松弛方法对其进行线性化处理,引入辅助变量 $\omega_{k,t}^{r,s}$ 代替 $f_{k,t}^{r,s} t_{k,t}^{r,s}$,则 $\omega_{k,t}^{r,s}$ 满足^[21]:

$$\begin{cases} \omega_{k,t}^{r,s} \geq f_{k,t}^{r,s} t_{k,t}^{r,s} + f_{k,t,\min}^{r,s} t_{k,t}^{r,s} - f_{k,t,\min}^{r,s} t_{k,t,\min}^{r,s} \\ \omega_{k,t}^{r,s} \leq f_{k,t}^{r,s} t_{k,t}^{r,s} + f_{k,t,\max}^{r,s} t_{k,t}^{r,s} - f_{k,t,\max}^{r,s} t_{k,t,\min}^{r,s} \\ \omega_{k,t}^{r,s} \geq f_{k,t}^{r,s} t_{k,t}^{r,s} + f_{k,t,\max}^{r,s} t_{k,t}^{r,s} - f_{k,t,\max}^{r,s} t_{k,t,\max}^{r,s} \\ \omega_{k,t}^{r,s} \leq f_{k,t}^{r,s} t_{k,t}^{r,s} + f_{k,t,\min}^{r,s} t_{k,t}^{r,s} - f_{k,t,\min}^{r,s} t_{k,t,\max}^{r,s} \end{cases} \quad (56)$$

式中: $t_{k,t,\max}^{r,s}$ 和 $t_{k,t,\min}^{r,s}$ 分别为 t 时段路径 k 通行时间的

上、下限; $f_{k,t,\max}^{r,s}$ 和 $f_{k,t,\min}^{r,s}$ 分别为 t 时段路径 k 交通流量的上、下限; $(r,s) \in \Psi^m$, 其中, $m \in \{g, e_1, e_2, e_3\}$, g 表示燃油汽车。

3) 二阶锥松弛方法

基于二阶锥松弛方法,式 (39) 可转换为二阶锥形式,具体如下^[30]:

$$\| [2P_{ij,t} \ 2Q_{ij,t} l_{ij,t} - v_{i,t}]^T \|_2 \leq l_{ij,t} + v_{i,t} \quad \forall ij \in \Omega_L, \forall t \in \Omega_T \quad (57)$$

经过上述转化,计及交通流的 FIDN 电动汽车承载能力计算模型转变为式 (58) 所示的混合整数二阶锥规划问题,可调用商业求解器进行求解。

$$\begin{cases} \max \sum_{t \in \Omega_T} \sum_{m \in \{e_1, e_2, e_3\}} \sum_{(r,s) \in \Psi^m} q_t^{r,s} \\ \text{s.t. 式(1)、式(2)、式(4)一式(24)、} \\ \text{式(26)一式(38)、式(40)一式(57)、} \\ \text{附录A式(A1)一式(A17)} \end{cases} \quad (58)$$

3.2 嵌套收紧松弛算法

为了提高模型求解精度与效率,设计基于顺序边界收紧 (sequential bound tightening, SBT) 算法^[31] 与渐紧线性切割 (increasingly tight linear cut, ITLC) 算法^[14] 的双层迭代框架,内层为 SBT 算法的迭代,外层为 ITLC 算法的迭代。嵌套收紧松弛算法的具体流程如图 2 所示。

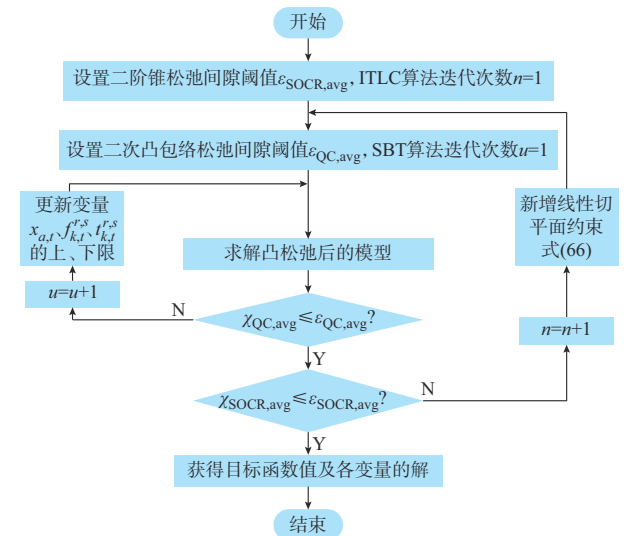


图 2 嵌套收紧松弛算法流程图
Fig. 2 Flow chart of nested tightening relaxation algorithm

1) SBT 算法

基于二次凸包络松弛方法松弛 $x_{a,t}^4$ 、 $f_{k,t}^{r,s} t_{k,t}^{r,s}$ 而引入的间隙 $\chi_{a,t}$ 、 $\chi_{k,t}^{r,s}$ 如式 (59)、式 (60) 所示。

$$\chi_{a,t} = \left| 1 - \frac{x_{a,t}^4}{\omega_{a,t}^{x^4}} \right| \quad \forall a \in \Omega_R, \forall t \in \Omega_T \quad (59)$$

$$\chi_{k,t}^{r,s} = \left| 1 - \frac{f_{k,t}^{r,s} t_{k,t}^{r,s}}{\omega_{k,t}^{f_{k,t}^{r,s} t_{k,t}^{r,s}}} \right| \quad \forall k \in K^{r,s}, \forall (r,s) \in \Psi^m, \\ \forall m \in \{g, e_1, e_2, e_3\}, \forall t \in \Omega_T \quad (60)$$

SBT算法通过迭代不断收紧变量 $x_{a,t}$ 、 $f_{k,t}^{r,s}$ 与 $t_{k,t}^{r,s}$ 的上下限以降低松弛间隙。以 $x_{a,t}$ 为例,SBT算法第 u 次($u \geq 2$)迭代时, $x_{a,t}$ 的上、下限 $x_{a,t,\max}^{(u)}$ 和 $x_{a,t,\min}^{(u)}$ 更新为:

$$x_{a,t,\max}^{(u)} = \min \{ x_{a,t}^{(u-1)} + \alpha (x_{a,t,\max}^{(u-1)} - x_{a,t,\min}^{(u-1)}), x_{a,t,\max}^{(u-1)} \} \\ \forall a \in \Omega_R, \forall t \in \Omega_T \quad (61)$$

$$x_{a,t,\min}^{(u)} = \max \{ x_{a,t}^{(u-1)} - \alpha (x_{a,t,\max}^{(u-1)} - x_{a,t,\min}^{(u-1)}), x_{a,t,\min}^{(u-1)} \} \\ \forall a \in \Omega_R, \forall t \in \Omega_T \quad (62)$$

式中: α 为收紧因子。

当二次凸包络松弛引入的平均松弛间隙 $\chi_{QC,avg}$ 低于阈值 $\epsilon_{QC,avg}$ 时,SBT算法停止迭代。 $\chi_{QC,avg}$ 的计算公式如下:

$$\chi_{QC,avg} = \frac{\chi_{QC,total}}{|\Omega_T| \left(|\Omega_R| + \sum_{m \in \{g, e_1, e_2, e_3\}} \sum_{(r,s) \in \Psi^m} |K^{r,s}| \right)} \quad (63)$$

$$\chi_{QC,total} = \sum_{t \in \Omega_T} \sum_{a \in \Omega_R} \left(\chi_{a,t} + \sum_{m \in \{g, e_1, e_2, e_3\}} \sum_{(r,s) \in \Psi^m} \sum_{k \in K^{r,s}} \chi_{k,t}^{r,s} \right) \quad (64)$$

式中: $|\cdot|$ 表示求集合中元素个数; $\chi_{QC,total}$ 为二次凸包络松弛引入的总松弛间隙。

2) ITLC算法

基于二阶锥松弛方法松弛线路首端功率约束引入的松弛间隙 $\chi_{ij,t}$ 的计算公式如下:

$$\chi_{ij,t} = \left| 1 - \frac{P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2}{l_{ij,t} v_{i,t}} \right| \quad \forall ij \in \Omega_L, \forall t \in \Omega_T \quad (65)$$

ITLC算法通过迭代生成收紧的线性切平面以减小二阶锥松弛引入的间隙。ITLC算法第 n 次($n \geq 2$)迭代生成的线性切平面为:

$$l_{ij,t} \leq \frac{(P_{ij,t}^{(n-1)})^2 + (Q_{ij,t}^{(n-1)})^2}{v_{i,t}^{(n-1)}} \quad \forall ij \in \Omega_L, \forall t \in \Omega_T \quad (66)$$

当二阶锥松弛引入的平均松弛间隙 $\chi_{SOCR,avg}$ 低于阈值 $\epsilon_{SOCR,avg}$ 时,ITLC算法停止迭代。 $\chi_{SOCR,avg}$ 的计算方式如下:

$$\chi_{SOCR,avg} = \frac{\sum_{t \in \Omega_T} \sum_{ij \in \Omega_L} \chi_{ij,t}}{|\Omega_T| |\Omega_L|} \quad (67)$$

4 算例分析

本文在改进的标准算例和实际算例中进行验证分析,在内置Yalmip工具包的MATLAB R2020b仿真平台调用Gurobi 9.5.0求解模型,计算机处理器为R7-5800H,主频为3.2 GHz,内存为16 GB。

4.1 算例1:改进的24节点FIDN和29节点交通网

4.1.1 算例1的设置

改进的24节点FIDN^[32]和29节点交通网^[24]结构如附录B图B1和图B2所示。FIDN常规负荷总功率为37.48 MW,基准电压为20 kV,变电站容量为10 MV·A,节点电压范围为0.93~1.07 p.u.;线路型号为LGJ-95,允许通过的最大电流为335 A;向上级电网购电电价见文献[33];充电站接于FIDN的节点17、18、2、11、5、10处,分别对应交通网的节点17、5、7、26、4、20,装设的充电桩功率分别为50、50、50、50、60、60 kW/台;光伏接于节点2、3、4、5、7、9、17、18,单位电量售电价格为0.35元/(kW·h);ESS接于节点4、5、7、12,单台容量为1 MW·h,初始荷电状态为0.5,荷电状态范围为0.1~0.9;SVC接于节点9、14、19,单台容量为0.5 Mvar;SOP接于线路1-14、2-3、4-7、4-15、5-6、7-11,单条线路的SOP安装容量为1 MV·A。单辆电动汽车的额定容量为50.1 kW·h,充/放电效率为95%,荷电状态低于0.2时产生充电需求,荷电状态范围为0.1~1.0;充电价格范围为0.4~1.5元/(kW·h),放电价格范围为0.35~1.5元/(kW·h);改变充电位置的满意度下限为0.8;第2、3种接入模式的电动汽车参与电网互动的的时间上限为4 h;3种接入模式的电动汽车比例为3:1:1;电动汽车与燃油汽车的比例为1:3;行程时间比上限 $T_{TTI,max}$ 为1.4。二阶锥松弛间隙阈值和二次凸包络松弛间隙阈值均设为0.4%。FIDN光伏功率与各功能区负荷功率曲线见附录B图B3,交通网车辆出行需求曲线见图B4^[34]。

4.1.2 算例1的优化计算结果

经优化计算,FIDN电动汽车承载能力为7 095辆,系统运行成本与相关指标如表1所示。

表1 FIDN运行成本与指标(算例1)
Table 1 Operation cost and indices for FIDN (case 1)

成本类型	成本/万元	指标类型	结果
购电成本	58.089	平均电压偏差	0.049 p.u.
网损成本	0.306	线路平均负载率	31.87%
总成本	58.395	变电站平均负载率	78.49%

交通流时空变化情况如附录B图B5所示。从图中可以看出,交通流空间分布较为均衡,但部分路

段在出行高峰期 07:00—09:00 和 17:00—19:00 处于拥堵状态。

各充电站电动汽车充放电电价如附录 B 图 B6 所示。从图中可以看出,电价根据 FIDN 和交通网的运行情况而变化,以引导电动汽车改变充电位置。充电站 10、11 分别位于商业区和办公区,08:00 时商业区常规负荷功率较低而办公区则较高,相比于充电站 11,充电站 10 剩余可接入负荷功率较高,且周围路段较为畅通,因而电动汽车充电电价较低;由于部分第 1 种接入模式电动汽车转移至充电站 10 充电,导致其附近电网具有一定的削峰需求,因而其电动汽车放电电价较高,以引导第 3 种接入模式电动汽车前往充电站 10 补能。3 种接入模式电动汽车改变充电位置的满意度与充电位置调整量随各充电站的电动汽车充放电价格、充电等待时间等因素而动态变化。由 O-D 对 (12, 26) 转移至 (12, 20) 的第 1 种接入模式电动汽车用户满意度与调整量动态变化曲线如附录 B 图 B7 所示。可见,仅当用户满意度不低于其阈值时,才可能会有电动汽车改变充电位置。但由于充电站 11 与 10 间的距离超过第 2、3 种接入模式电动汽车的调控距离,故该类型电动汽车不会由 O-D 对 (12, 26) 转移至 (12, 20)。

各充电站不同接入模式的电动汽车充放电功率如图 3 所示。第 1 种接入模式的电动汽车充电功率在 07:00—09:00 和 17:00—19:00 达到高峰,大幅提高了 FIDN 的负荷峰值;而第 2 种接入模式的电动汽车在上述时段充电功率较小以减轻常规负荷与充电负荷高峰的叠加;部分第 3 种接入模式的电动汽车在 08:00—09:00、17:00—19:00 向 FIDN 返送功率,从而降低配电网电压越限、变电站(线路)过载的风险;由于参与电网互动的时间有限,第 2、3 种接入模式的电动汽车高峰时段的充电需求主要转移至 10:00—12:00 与 20:00—22:00。FIDN 电动汽车承载能力时序情况如附录 B 图 B8 所示。结合图 3 可知,08:00—09:00 电动汽车充电功率较高,导致节点 22、23 对应变电站处于临界过载运行状态,这是限制 FIDN 电动汽车承载能力的关键因素。

4.1.3 交通网约束对 FIDN 电动汽车承载能力的影响

为了验证计算 FIDN 电动汽车承载能力时考虑交通流影响的必要性,本节计算了未计及交通流情况下 FIDN 电动汽车承载能力,并与 4.1.2 节结果进行对比。未计及交通流情况下 FIDN 能够承载的电动汽车数量为 7 280 辆,与考虑交通流相比,结果偏高 2.61%,各充电站电动汽车充放电功率如附录 B 图 B9 所示。结合图 B5、图 B9 和图 3 可知,未考虑交

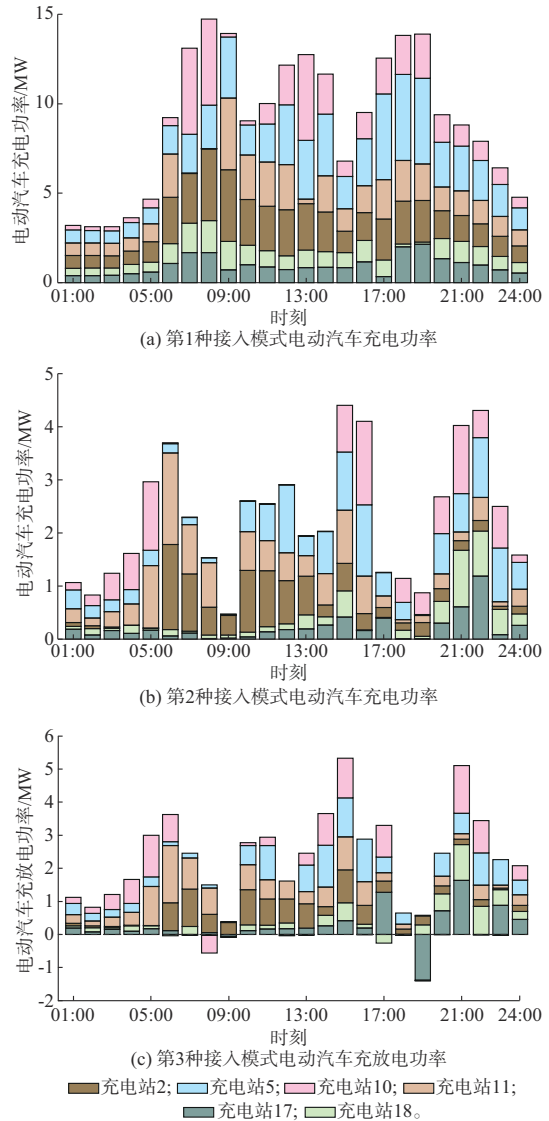


图 3 各充电站不同接入模式下的电动汽车充放电功率
Fig. 3 Charging and discharging power of electric vehicles in different integration modes at each charging station

通流的情况下,在 07:00—09:00 倾向于将较多的第 1 种接入模式电动汽车调控至充电站节点 5 充电,但易造成附近路段拥堵,并进一步影响交通网的交通流分布、改变车辆行驶时间,导致用户难以在最大容忍时间内到达充电站,因而该情况下 FIDN 电动汽车承载能力计算结果偏高。

为了进一步分析交通网运行通畅程度要求对 FIDN 电动汽车承载能力的影响,设置不同 $T_{TTI,max}$ 并计算相应情况下 FIDN 电动汽车承载能力及系统运行成本、指标,如附录 B 表 B1 所示。其中, $T_{TTI,max}$ 为 1.1 时各充电站电动汽车充放电功率如附录 B 图 B10 所示。由附录 B 表 B1 可知,随着 $T_{TTI,max}$ 由 1.5 降低至 1.1,对交通网运行通畅程度的要求逐渐提

升, FIDN能够承载的电动汽车数量也随之降低。结合图B10和图3分析可知, 相比 $T_{TTI,max}=1.4$ 时, $T_{TTI,max}=1.1$ 情况下08:00时路段2-4、13-4等的实际行程时间比已接近上限要求, 限制了前往上述路段附近的充电站5补能的电动汽车数量, 但FIDN安全运行约束下其他充电站能够满足的电动汽车充电需求也有限, 从而降低了FIDN承载的电动汽车数量。而当 $T_{TTI,max}$ 由1.5上升至1.6时, FIDN电动汽车承载能力计算结果不变。这是因为进一步放松交通网运行通畅程度的要求时, 在满足汽车行驶时间约束与用户满意度约束的情况下, FIDN已难以接纳更高的充电负荷, 电动汽车承载能力主要受制于充电桩数量限制、FIDN线路/变电站等设备的安全运行要求。当 $T_{TTI,max}$ 由1.1提升至1.6时, 由于FIDN承载的电动汽车数量逐渐增加直至不变, FIDN购电成本、网损成本、线路平均负载率与变电站平均负载率逐渐上升后基本不变; 由于SVC、ESS、SOP等的调节作用, FIDN平均电压偏差保持在安全运行范围内。

上述结果表明, 交通网的运行状态会对电动汽车的充电位置产生影响, 进而影响FIDN能够承载的电动汽车数量与运行结果。因此, 在FIDN电动汽车承载能力计算时考虑交通流是非常必要的。

4.1.4 不同SOP接入容量对配电网电动汽车承载能力的影响

为了验证SOP接入对提升配电网电动汽车承载能力的有效性, 本节计算了不同SOP接入容量下配电网能够承载的电动汽车数量及系统运行成本、指标, 如附录B表B2所示。配电网未接入SOP时各充电站的充放电功率如附录B图B11所示。

由附录B表B2可知, 当SOP接入容量增大时, 配电网能够承载的电动汽车数量逐渐提升后趋于平缓。配电网电动汽车承载能力逐渐提升的原因在于SOP能够充分利用居民区、办公区和商业区的常规负荷及电动汽车负荷的差异性, 实现不同功能区的功率快速转移。此外, SOP还能提供一定的无功支撑, 减小电动汽车负荷大幅增加引起的电压偏差。以SOP为基础的柔性互联模式相比于传统网络重构模式, 能够适应电动汽车充电负荷在短时间内激增的情形, 根据负荷变化实时响应, 快速连续调节功率, 具备更高的灵活性。4.1.1节所设情景下, SOP输出功率曲线如附录B图B12所示。变电站23与充电站10、11直接相连, 所连节点(包括节点3、4、10、11、16)净负荷功率之和较大。为了缓解变电站23的供电压力, 大部分时段的SOP由端口15向4传输功率。在1~16 h、21~24 h, SOP传输的有功功

率变化趋势与变电站23所连节点净负荷功率的变化趋势基本一致; 而在17~20 h, 由于居民区电动汽车充电需求和常规负荷功率之和较高, 且光伏输出功率逐渐降低, 尽管变电站23所连节点净负荷功率较高, 但SOP向节点4传输的有功功率有所下降甚至为负。SOP与充电站所在节点较近, 且光伏容量有限, 所以多数时段提供无功功率。7~15 h虽然无功补偿需求较高, 但SOP所提供无功功率较低, 其原因在于容量限制下, SOP优先通过有功功率传输改善负荷分布。由图3和附录B图B11可知, SOP的接入增强了配电网的广域功率调节能力, 配电网多数充电站尤其是充电站10能够满足更高的电动汽车充电需求。与未接入SOP相比, 接入6 MV·A的SOP后配电网电动汽车承载能力提升了15.65%。但SOP容量达到一定程度后再增长, 不会进一步增强配电网的电动汽车承载能力, 这是因为变电站的容量、SOP两端连接的线路容量有限。随着SOP容量的增大, 配电网承载的电动汽车数量逐渐增加后不变, 配电网购电成本与变电站平均负载率逐渐上升后基本不变; 由于SOP功率调节作用的增强, 尽管配电网承载的电动汽车数量有所变化, 但平均电压偏差、线路平均负载率、网损成本变化幅度较小。

上述结果表明, SOP的接入能够改善配电网线路负荷分布与电压水平, 有效提升配电网对电动汽车的承载能力。

4.1.5 不同汽车比例系数对FIDN电动汽车承载能力的影响

设置了燃油汽车与3种接入模式的电动汽车的比例系数($\zeta(g): \zeta(e_1): \zeta(e_2): \zeta(e_3)$), 相应情况下FIDN电动汽车承载能力计算结果如附录B表B3所示。对比情景1~4, 3种接入模式的电动汽车的比例系数不变, 随着燃油汽车占比减小, 电动汽车空间可调控性有所提升、受交通流影响逐渐降低, FIDN电动汽车承载能力有所增长; 受限于FIDN安全运行约束与充电桩数量, 电动汽车承载能力最终趋于不变, 与不考虑交通流情况下的结果一致。然而, 如果在未来对FIDN进行改造扩建, 使得FIDN能够接纳更高的电动汽车负荷, 并影响到交通网运行通畅程度, 则在电动汽车比例较高的情况下, FIDN电动汽车承载能力评估时仍然需要考虑交通流影响。燃油汽车与电动汽车的比例系数不变, 对比情景2、5, 当含有第3种接入模式的电动汽车时, 由于该类型电动汽车的充放电功率可以调节, FIDN能够承载更多的电动汽车。对比情景5、6, 当FIDN仅含有第1种接入模式的电动汽车时, 电动汽

车承载能力较低。在充电桩数量无限的情况下,当 $\zeta(g):\zeta(e_1):\zeta(e_2):\zeta(e_3)=3:1:0:0$ 时,FIDN也仅能承载4 832辆电动汽车,说明情景6中FIDN电动汽车承载能力降低的原因并非充电桩数量不足,而是电动汽车充电功率无法调节。

4.1.6 算例1中算法的有效性分析

以4.1.1节所设情景为例(其中, $T_{TTI,max}=1.4$,SOP总容量为 $6\text{ MV}\cdot\text{A}$),对该情景下的模型进行求解。若不采用收紧松弛策略,直接利用商业求解器求解松弛后的模型,则平均二次凸包络松弛间隙与平均二阶锥松弛间隙分别为82.92%、35.93%,松弛间隙较高,且FIDN电动汽车承载能力计算结果为7 215辆,离原问题最优解较远。若仅采用SBT算法^[31]或ITLC算法^[14]求解松弛后的模型,则仅能显著降低二次凸包络松弛或二阶锥松弛单方面带来的松弛间隙,平均二阶锥松弛间隙或平均二次凸包络松弛间隙仍分别高达35.33%、83.15%。而采用本文所提算法求解模型,平均二次凸包络松弛间隙与平均二阶锥松弛间隙均低于0.4%,算法迭代过程如图4所示。其中,外层ITLC算法迭代2次,内层SBT算法共迭代6次。在ITLC算法的第1、2次迭代中,SBT算法分别迭代了4次和2次达到收敛条件。

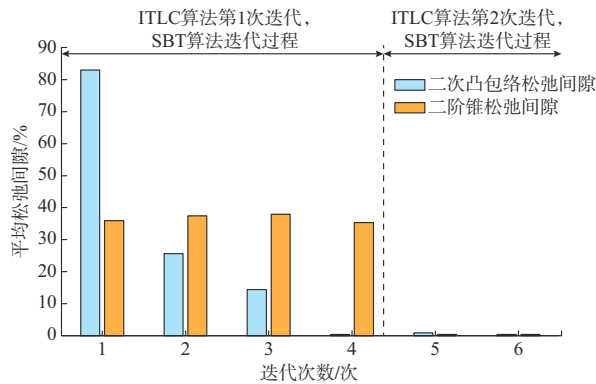


图4 嵌套收紧松弛算法迭代过程
Fig. 4 Iterative process of nested tightening relaxation algorithm

为了进一步验证嵌套收紧松弛算法的有效性,设置了以下两种方法求解模型并比较分析,结果如表2所示。其中,方法1采用基于SBT算法与ITLC算法的单层收紧松弛算法求解松弛后的模型,即在每次迭代中更新变量 $x_{a,i}, f_{k,i}^{l,s}, t_{k,i}^{l,s}$ 的上、下限以及线性切平面约束式(66);方法2采用本文所提算法求解松弛后的模型。

方法1、2均对二次凸包络松弛与二阶锥松弛进行收缩。相比方法1,方法2尽管迭代次数较多,但

表2 不同方法结果对比

Table 2 Comparison of results with various methods

方法	$\chi_{QC,avg}/\%$	$\chi_{SOCR,avg}/\%$	电动汽车承载能力/辆	迭代次数/次	求解时间/s
1	0.39	0.25	7 095	4	2 154
2	0.35	0.36	7 095	6	1 489

单次迭代的平均求解时间较少,总求解时间减少了30.87%,能够在松弛间隙满足精度要求的情况下有效提高求解速度。

4.2 算例2:改进的福建省某电力-交通耦合系统

4.2.1 算例2的设置

在改进的福建省某56节点配电网和45节点交通网中进一步验证分析所提方法的有效性,网络结构和参数详见文献[35]。交通网车辆出行需求数据来自文献[36],变化曲线见附录B图B13,光伏与负荷功率变化曲线见附录B图B14。配电网常规负荷总功率为3.45 MW,基准电压为10 kV,变电站容量为 $4\text{ MV}\cdot\text{A}$;向上级电网购电电价参考文献[37];配电网节点10、29、33、44接入的充电桩功率分别为60、120、60、120 kW;可控分布式电源接于节点10、23、39和44,光伏接于节点13、26、32和47;ESS接于节点8、28、33和45,单台容量为 $0.5\text{ MW}\cdot\text{h}$;SVC接于节点19、21、30和53,单台容量为0.6 Mvar;SOP接于线路3-29、9-44和19-54,单条线路的SOP安装容量为 $1\text{ MV}\cdot\text{A}$ 。电动汽车与燃油汽车的比例为1:12。其余参数设置和算例1一致。

4.2.2 算例2的优化计算结果

该配电网电动汽车承载能力计算结果为1 615辆,系统运行成本与指标如表3所示。

表3 FIDN运行成本与指标(算例2)
Table 3 Results of operation cost and indices for FIDN (case 2)

成本类型	成本/万元	指标类型	结果
购电成本	11.503	平均电压偏差	0.039 p.u.
网损成本	0.243	线路平均负载率	20.64%
总成本	11.746	变电站平均负载率	43.07%

交通流的时空变化情况如附录B图B15所示。各充电站电动汽车充放电电价如附录B图B16所示。与60 kW充电桩相比,充电功率不可调电动汽车更倾向于前往120 kW充电桩补能。为了减轻配电网运行风险并提高交通网通畅程度,在08:00和16:00—18:00,安装60 kW充电桩的充电站10与33的充电价格相对较低,以引导电动汽车前来充电;在17:00—18:00,充电站33由于常规负荷功率与电动汽车充电功率的提升,存在较高的削峰需求,且附近

路段未达到允许的最大拥堵状态,其放电电价较高。将从起点41至充电站44的3类接入模式的电动汽车调控至充电站33的用户满意度与调整量动态变化曲线如附录B图B17所示。从图中可以看出,第1种接入模式的电动汽车空间调控量较大,而第2、3种接入模式的电动汽车空间调控量相对较小。

各充电站不同接入模式的电动汽车充放电功率如附录B图B18所示。通过对第2、3种接入模式的电动汽车负荷功率的时间转移,一定程度上降低了配电网的负荷功率高峰。FIDN电动汽车承载能力时序情况如图5所示。结合附录B图B18可知,17:00时第1种接入模式的电动汽车充电功率处于最高水平,叠加常规负荷后导致线路23-25、25-26等重载且可控分布式电源满载运行,限制了该典型日FIDN的总电动汽车承载能力。

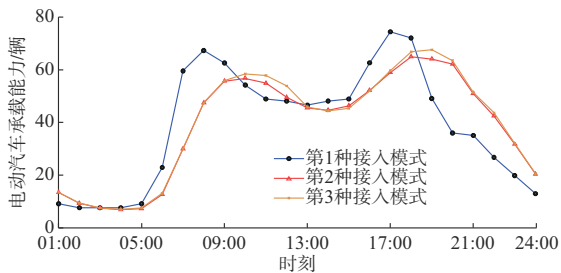


图5 FIDN电动汽车承载能力时序变化曲线
Fig. 5 Temporal variation curves for electric vehicle hosting capacity in FIDN

SOP端口3、9靠近馈线首端,端口29和44靠近充电站;SOP端口19所在馈线负荷相对较轻,而端口54所在馈线则较重。因此,SOP分别从端口3、9、19向29、44和54传输有功功率。SOP 3-29、SOP 9-44和SOP 19-54输出功率曲线如附录B图B19所示。在06:00—21:00,常规负荷功率与电动汽车负荷功率叠加后较高,SOP传输的有功功率处于较高水平。SOP各端口均提供无功支撑,但由于部分端口接近馈线首端、部分端口附近装有可控分布式电源、SVC等装置,与其余可提供无功补偿的装置协同配合,无功补偿功率相对较小。

4.2.3 算例2的结果对比分析

不考虑交通流的情况下,该配电网能够承载的电动汽车数量为1800辆,与4.2.2节结果相比,偏高了11.46%。这是由于该情形下忽略了交通网的运行状况,充电站29所在节点接有SOP,且离馈线首端与可控分布式电源相对较近,较多电动汽车于充电站29补能,易造成局部拥堵,影响车辆行驶时间,导致电动汽车抵达时间可能超过其最大容忍时间。

此外,进一步计算不同 $T_{TTI,max}$ 下配电网电动汽车承载能力,见附录B表B4。可见,随着 $T_{TTI,max}$ 的增长,配电网电动汽车承载能力逐渐增大后趋于不变。上述结果说明交通网约束会对配电网电动汽车承载能力计算结果产生影响。

不同SOP接入容量下配电网电动汽车承载能力计算结果见附录B表B5。随着SOP接入容量的提升,配电网能够承载的电动汽车数量逐渐增大后趋于不变。上述结果说明通过接入SOP有助于支撑配电网对电动汽车的承载能力。

不同燃油汽车与电动汽车比例系数下配电网电动汽车承载能力计算结果见附录B表B6中的情景4、11~13。随着燃油汽车占比的降低,配电网电动汽车承载能力计算结果逐渐提升后趋于不变。上述结果说明燃油汽车与电动汽车的比例会影响配电网电动汽车承载能力计算结果。3种接入模式的电动汽车在不同比例下的配电网电动汽车承载能力计算结果见附录B表B6中的情景4、14、15。相较于仅有第1种接入模式的电动汽车,3种接入模式的电动汽车在3:1:0和3:1:1比例下,配电网对电动汽车的承载能力分别提升了60.63%和101.88%。

4.2.4 算例2中算法的有效性分析

采用商业求解器直接求解4.2.1节所设情景下的模型,平均二次凸包络松弛间隙与平均二阶锥松弛间隙分别高达68.10%、24.12%,达不到求解精度要求。而基于嵌套收紧松弛算法求解模型,经过5次迭代,计算耗时为1865s,平均二次凸包络松弛间隙与平均二阶锥松弛间隙分别降至0.37%和0.28%,算法迭代过程如附录B图B20所示。在ITLC算法的第1、2次迭代中,SBT算法分别迭代了3次和2次达到收敛条件。

5 结语

在电动汽车保有量持续增长与电力网-交通网深度耦合背景下,本文提出了交通流影响下FIDN电动汽车承载能力计算方法。在某一典型运行场景下评估FIDN能够承载的电动汽车规模,精细化考虑交通流的影响,计及SOP的灵活可调能力,并采用嵌套收紧松弛算法实现了模型的高效求解,为配电网规划提供基础与参考。结合算例分析,得出了以下结论:

1)与考虑交通流相比,未计及交通流情况下FIDN电动汽车承载能力计算结果偏高。且当交通网运行通畅程度的要求降低或电动汽车占比提升时,FIDN能够承载的电动汽车数量逐渐提升后趋于平缓。

2)接入 SOP 能够实现不同馈线间的功率互济以改善负荷分布,从而提升配电网对电动汽车的承载能力;充电功率可调和充放电功率可调电动汽车的接入可以减轻充电负荷与常规负荷高峰的叠加,有助于增强 FIDN 电动汽车承载能力。

3)相比于单层收紧松弛算法,使用嵌套收缩松弛算法求解本文所提模型能够在保证求解精度的情况下有效降低计算时间。

为了兼顾求解精度与效率,本文在半动态交通流模型基础上开展研究,对电力-交通短时间尺度的交互、电动汽车引入的不确定性等考虑不足。如何在计算 FIDN 电动汽车承载能力时进一步精细化考虑交通流在短时间尺度的变化与多重不确定因素,并探索高效求解算法,值得进一步研究。此外,随着电动汽车大规模普及,多微电网、孤立电网等应用场景下考虑交通流的电动汽车承载能力计算技术也是后续的研究方向之一。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参 考 文 献

- [1] SHEN Y C, ZHANG S X, DING M S, et al. Expansion planning of soft open points based distribution system considering EV traffic flow [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2024, 60(1): 1229-1239.
- [2] 黄梦旗,李勇汇,杨军,等.电动汽车空间可调度特性影响下配电网承载能力计算方法[J].电网技术,2024,48(10):4252-4266. HUANG Mengqi, LI Yonghui, YANG Jun, et al. Calculation method of distribution network carrying capacity under the influence of spatial schedulability characteristics of electric vehicles [J]. Power System Technology, 2024, 48(10): 4252-4266.
- [3] 王婷,陈晨,谢海鹏.配电网对分布式电源和电动汽车的承载力评估及提升方法综述[J].电力建设,2022,43(9):12-24. WANG Ting, CHEN Chen, XIE Haipeng. Review on evaluation and promotion methods of carrying capacity for distributed generation and electric vehicles in distribution network [J]. Electric Power Construction, 2022, 43(9): 12-24.
- [4] 田梦瑶,汤波,杨秀,等.综合考虑充电需求和配电网接纳能力的电动汽车充电站规划[J].电网技术,2021,45(2):498-509. TIAN Mengyao, TANG Bo, YANG Xiu, et al. Planning of electric vehicle charging stations considering charging demands and acceptance capacity of distribution network [J]. Power System Technology, 2021, 45(2): 498-509.
- [5] 郭毅,胡泽春,张洪财,等.居民区配电网接纳电动汽车充电能力的统计评估方法[J].电网技术,2015,39(9):2458-2464. GUO Yi, HU Zechun, ZHANG Hongcai, et al. A statistical method to evaluate the capability of residential distribution network for accommodating electric vehicle charging load [J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2458-2464.
- [6] DIMAS C, RAMOS G, CARO L, et al. Parallel computing and multicore platform to assess electric vehicle hosting capacity [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(5): 4709-4717.
- [7] THEN J, AGALGAONKAR A P, MUTTAQI K M. Hosting capacity of an Australian low-voltage distribution network for electric vehicle adoption [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2024, 60(2): 2601-2610.
- [8] KARFOPOULOS E L, HATZIARGYRIOU N D. Distributed coordination of electric vehicles providing V2G services [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1): 329-338.
- [9] YU H, LEI X, NIU S Y, et al. Enhancing electric vehicle penetration and grid operation performance in old residential communities through hybrid AC/DC microgrid reconstruction [J]. Applied Energy, 2023, 347: 121459.
- [10] ZAIDI A H, SUNDERLAND K, CONLON M. Role of reactive power (STATCOM) in the planning of distribution network with higher EV charging level [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13(7): 951-959.
- [11] HUMAYD A S B, BHATTACHARYA K. A novel framework for evaluating maximum PEV penetration into distribution systems [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4): 2741-2751.
- [12] 李宏仲,汪瑶,胡哲晟,等.双碳背景下配电网对多元接入体的承载能力评估[J].电网技术,2022,46(9):3595-3604. LI Hongzhong, WANG Yao, HU Zhesheng, et al. Carrying capacity assessment of distribution network for multiple access bodies under the background of double carbon [J]. Power System Technology, 2022, 46(9): 3595-3604.
- [13] 胡鹏飞,朱乃璇,江道灼,等.柔性互联智能配电网关键技术研究进展与展望[J].电力系统自动化,2021,45(8):2-12. HU Pengfei, ZHU Naixuan, JIANG Daozhuo, et al. Research progress and prospects of key technologies of flexible interconnected smart distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8): 2-12.
- [14] 方一晨,张沈习,程浩忠,等.含智能软开关的主动配电网分布式光伏准入容量鲁棒优化[J].电力系统自动化,2021,45(7): 8-17. FANG Yichen, ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, et al. Robust optimization of distributed photovoltaic hosting capacity of active distribution network with soft open point [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(7): 8-17.
- [15] ZHANG S X, FANG Y C, ZHANG H, et al. Maximum hosting capacity of photovoltaic generation in SOP-based power distribution network integrated with electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(11): 8213-8224.
- [16] 张沈习,王浩宇,李然,等.考虑智能软开关接入的主动配电网扩展规划方法[J].中国电机工程学报,2023,43(1):48-61. ZHANG Shenxi, WANG Haoyu, LI Ran, et al. Active distribution network expansion planning method considering the integration of soft open point [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 48-61.
- [17] 葛少云,侯亭玉,吴鸣,等.柔性互联配电网分布式电源承载能

- 力分布鲁棒优化模型[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(13): 140-148.
- GE Shaoyun, HOU Tingyu, WU Ming, et al. Distributionally robust optimization model of hosting capability for distributed generators in flexible interconnected distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(13): 140-148.
- [18] 何叶, 杨晓东, 吴红斌, 等. 面向新型配电系统灵活性提升的智能软开关与储能系统协调规划[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(18): 142-150.
- HE Ye, YANG Xiaodong, WU Hongbin, et al. Coordinated planning of soft open point and energy storage system for flexibility enhancement of new distribution system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(18): 142-150.
- [19] 黄学良, 刘永东, 沈斐, 等. 电动汽车与电网互动: 综述与展望[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(7): 3-23.
- HUANG Xueliang, LIU Yongdong, SHEN Fei, et al. Vehicle to grid: review and prospect [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(7): 3-23.
- [20] 陈鹏, 刘友波, 袁川, 等. 考虑电动汽车充电模式的配电网可开放容量提升改造策略[J/OL]. 电网技术[2024-02-21]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.2236>.
- CHEN Peng, LIU Youbo, YUAN Chuan, et al. Strategy for enhancing the available capacity of distribution networks considering electric vehicle charging modes [J/OL]. Power System Technology [2024-02-21]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.2236>.
- [21] LV S, WEI Z N, SUN G Q, et al. Optimal power and semi-dynamic traffic flow in urban electrified transportation networks [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(3): 1854-1865.
- [22] 崔岩, 胡泽春, 段小宇. 考虑充电需求空间灵活性的电动汽车运行优化研究综述[J]. 电网技术, 2022, 46(3): 981-994.
- CUI Yan, HU Zechun, DUAN Xiaoyu. Review on the electric vehicles operation optimization considering the spatial flexibility of electric vehicles charging demands [J]. Power System Technology, 2022, 46(3): 981-994.
- [23] 柯松, 陈磊, 杨军, 等. 基于半动态交通流模型的电动汽车出行引导策略[J]. 电网技术, 2023, 47(8): 3362-3380.
- KE Song, CHEN Lei, YANG Jun, et al. Electric vehicles travel guidance strategy based on semi-dynamic traffic flow state model [J]. Power System Technology, 2023, 47(8): 3362-3380.
- [24] 玉少华, 杜兆斌, 陈丽丹, 等. 融合路网-电网信息的电动汽车充放电行为引导与调控策略[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(7): 169-180.
- YU Shaohua, DU Zhaobin, CHEN Lidian, et al. Guidance and regulation strategy for charging and discharging behaviors of electric vehicles based on fusion of road network and power grid information [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(7): 169-180.
- [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] 江昌旭, 卢玥君, 袁羽娟, 等. 考虑里程焦虑的高速公路充电站及配电网扩展规划[J/OL]. 电网技术[2024-07-31]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.0707>.
- JIANG Changxu, LU Yuejun, YUAN Yujuan, et al. Highway charging station and distribution network expansion planning considering range anxiety [J/OL]. Power System Technology [2024-07-31]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.0707>.
- [27] 程杉, 吴思源, 孙伟斌. 考虑电压稳定性和充电服务质量的电动汽车充电站规划[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 12-21.
- CHENG Shan, WU Siyuan, SUN Weibin. Optimal planning of charging stations for electric vehicles considering voltage stability of distribution system and the quality of service [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 12-21.
- [28] 周玮, 徐从明, 杨丹霞, 等. P2P 能源共享下考虑意愿动态调整的电动汽车群需求响应策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(21): 8217-8230.
- ZHOU Wei, XU Congming, YANG Danxia, et al. Research on demand response strategy of electric vehicles considering dynamic adjustment of willingness under P2P energy sharing [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(21): 8217-8230.
- [29] LI J Q, XU X Y, YAN Z, et al. Coordinated optimization of emergency response resources in transportation-power distribution networks under extreme events [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(6): 4607-4620.
- [30] 林哲, 胡泽春, 宋永华. 最优潮流问题的凸松弛技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(13): 3717-3728.
- LIN Zhe, HU Zechun, SONG Yonghua. Convex relaxation for optimal power flow problem: a recent review [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(13): 3717-3728.
- [31] ROJAS-RODRIGUEZ J C, AGUILAR-BUSTOS A Y, BUGARIN E. Whole body motion generation with centroidal dynamics of legged robots using sequential bounds tightening of McCormick envelopes [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2023, 164: 104401.
- [32] MUNOZ-DELGADO G, CONTRERAS J, ARROYO J M. Joint expansion planning of distributed generation and distribution networks [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5): 2579-2590.
- [33] 张忠会, 雷大勇, 蒋昌辉, 等. 基于二阶锥规划和NNC法的交直流混合配电网双层规划模型及其求解方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(1): 70-85.
- ZHANG Zhonghui, LEI Dayong, JIANG Changhui, et al. A bi-level planning model and its solution method of AC/DC hybrid distribution network based on second-order cone programming and NNC method [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 70-85.
- [34] 吴赋章, 杨军, 柯松, 等. 考虑电力-交通交互的配电网故障下电动汽车充电演化特性[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(5): 88-98.
- WU Fuzhang, YANG Jun, KE Song, et al. Evolution

characteristics of electric vehicle charging under distribution network faults considering interactions between power and transportation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(5): 88-98.

[35] 谢仕伟,陈铠悦,张亚超,等.考虑需求弹性的电力-交通网络双层博弈模型——基于拟变分不等式[J].中国电机工程学报, 2024, 44(6): 2185-2197.

XIE Shiwei, CHEN Kaiyue, ZHANG Yachao, et al. A two-layer game model for power-transportation coupled networks considering demand elasticity—based on quasi-variational inequalities[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(6): 2185-2197.

[36] 2021年第四季度福州城区交通分析报告[R].福州:福建省公安厅交通警察总队, 2022.

Traffic analysis report of Fuzhou city in the fourth quarter of 2021 [R]. Fuzhou: Traffic Police Corps of Fujian Provincial Public Security Department, 2022.

[37] 福建省发展和改革委员会关于完善分时电价政策的通知[EB/

OL]. [2024-08-10]. https://fgw.fujian.gov.cn/zfxgkzl/zfxgkml/bwgfxwj/202311/t20231129_6309872.htm.

Fujian Provincial Development and Reform Commission on improving the policy of TOU tariff [EB/OL]. [2024-08-10]. https://fgw.fujian.gov.cn/zfxgkzl/zfxgkml/bwgfxwj/202311/t20231129_6309872.htm.

曹佳晨(2000—),女,硕士研究生,主要研究方向:配电网优化运行、电动汽车优化调控。E-mail:caojiachen@sjtu.edu.cn

张沈习(1988—),男,通信作者,博士,副研究员,博士生导师,主要研究方向:新能源电力系统优化规划与高效运行、综合能源系统优化规划与多维评价。E-mail:willzxs@sjtu.edu.cn

张璐(1990—),男,博士,副教授,主要研究方向:配电网规划与优化运行。E-mail:zhanglu1@cau.edu.cn

(编辑 王梦岩)

Calculation Method for Electric Vehicle Hosting Capacity of Flexibly Interconnected Distribution Network Considering Traffic Flow

CAO Jiachen¹, ZHANG Shenxi¹, ZHANG Lu², LIU Wenliang³, CAO Yi⁴, LIANG Yu⁴

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education (Shanghai Jiao Tong University), Shanghai 200240, China; 2. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 3. Xiamen Power Supply Company of State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Xiamen 361000, China; 4. Energy Research Institute of China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: The temporal-spatial variation of traffic flow leads to changes in the distribution of electric vehicle charging demand, which further affects the electric vehicle hosting capacity in the distribution network. In order to elaborately consider the influence of traffic flow, a calculation method for the electric vehicle hosting capacity in the flexibly interconnected distribution network (FIDN) considering traffic flow is proposed. This method considers the flexible adjustable ability of the soft open point to reduce the adverse effect of large-scale electric vehicle integration on distribution networks. Firstly, based on semi-dynamic traffic flow model, a regulation model for electric vehicles with various integration modes is established. Secondly, considering the regulation measures of electric vehicles under the influence of traffic flow, a calculation model for the electric vehicle hosting capacity in FIDN considering traffic flow is proposed to maximize the number of electric vehicles that can be carried. Then, the model is transformed by the quadratic convex relaxation method, the big-M method and the second-order cone relaxation method. To reduce the relaxation gap, a nested tightening relaxation algorithm is proposed to solve the model. Finally, the validity of the proposed model and algorithm is verified by the test and analysis in the modified standard case and an actual case in Fujian Province of China.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 52177099, No. 51907123) and Shanghai Rising-Star Program (No. 23QA1405400).

Key words: flexible interconnection; distribution network; electric vehicle; hosting capacity; traffic flow; nested tightening relaxation algorithm; soft open point (SOP);

