

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230558

混合交通流下计及储能型柔性开关影响的 交通-配电网联合规划

卢慧, 谢开贵, 胡博, 邵常政, 王宇, 胡胤哲

(重庆大学输变电装备技术全国重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 电动汽车(electric vehicle, EV)的大规模发展, 使得交通网转变为电动汽车和燃油车(gasoline vehicle, GV)随机混合出行的复杂网络; 配电网也转变为供需双侧不确定、“源-网-站-储”高效互动的低碳型电网。在新型交通-配电网耦合系统下, 亟需研究交通和配电网的联合规划方法, 以满足 EV 时空充电需求, 保障交通和配电网的安全可靠运行。为此, 基于 EV 和 GV 的实时能耗特性差异, 建立了混合交通流分配模型, 以充分反映 GV 对 EV 出行和充电行为的影响, 进而建立了混合交通流下的交通网多阶段规划模型。此外, 考虑储能型柔性开关(energy storage integrated soft open points, E-SOP)的运行特性, 协同“源-网-站-储”, 建立了 E-SOP 影响的配电网多阶段规划模型。结合交通-配电网物理和“流量-功率”耦合约束, 实现了交通-配电网的联合规划。根据 Sioux Falls 交通网和 IEEE 69 节点配电网组成的耦合系统算例测试, 验证了所提联合规划模型比独立规划的总成本减少了 7.21%, 并且 E-SOP 的接入能减少系统无功出力 and 电压波动。

关键词: 混合交通流; 储能型柔性开关; 交通网; 配电网; 联合规划

Coordinated planning of transportation and distribution networks with mixed traffic flow and E-SOP

LU Hui, XIE Kaigui, HU Bo, SHAO Changzheng, WANG Yu, HU Yinzhe

(National Key Laboratory of Power Transmission Equipment Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The large-scale development of electric vehicles (EVs) has transformed the transportation network into a complex network with random and mixed travel of EVs and gasoline vehicles (GVs), and the distribution network has also been a low-carbon grid with uncertain supply and demand, including the interaction of source-grid-station-storage. In the transportation-distribution coupling system (TDCS), it is urgent to develop a coordinated planning method to meet the spatiotemporal charging needs of EVs and ensure the safe operation of the TDCS. Therefore, based on the real-time energy consumption characteristics of EVs and GV, a mixed traffic flow assignment model is established to better reflect the influence of GV on the travel and charging behavior of EVs. Then, a multistage planning model of the transportation network in mixed traffic flow is established. Considering the operational characteristics of energy storage integrated soft open points (E-SOP), and cooperating with source-grid-station-storage, a multistage planning model of the distribution network affected by E-SOP is established. Combining with the physical and flow-power coupling constraints, a coordinated planning model is proposed. Based on the case studies of the Sioux Falls transportation network and IEEE 69-node distribution network coupling system, it is verified that the coordinated planning method can reduce the total planning cost by 7.21% compared to separate planning, and E-SOP can reduce the reactive power output and voltage fluctuation of the system.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52022016).

Key words: mixed traffic flow; E-SOP; transportation network; distribution network; coordinated planning

0 引言

在双碳背景下, 电动汽车(electric vehicle, EV)将

逐步替代燃油车(gasoline vehicle, GV)成为交通网的主要关注点^[1-2], 这使得交通网和配电网深度耦合。在交通侧, 由于 EV 和 GV 具有不同的补充燃料方式和能耗特性, 二者的混合运行将导致交通网的规划和运行方式发生变化; 在配电侧, EV 的随机

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52022016)

充电需求对配电网的基础设施^[3-11], 如分布式电源(distributed generator, DG)、充电站(charging station, CS)、储能和线路等的规划和运行方式产生了重大影响。

此外, 储能型柔性开关(energy storage integrated soft open points, E-SOP)具有动作次数不受限制、功率连续可控和运行模式柔性切换等优势^[12], 能有效应对分布式电源波动、减少输电阻塞以及协调各种时空灵活性资源等, 其位置、容量和运行策略将影响交通-配电网耦合系统中其他设施的规划和运行^[13]。

因此, 亟需研究 EV 和 GV 混合交通流分配方法, 并考虑 E-SOP 的运行特性进行交通-配电网联合规划, 以满足 EV 的时空充电需求, 进一步促进交通和配电网的深度融合。

传统交通网规划时, 其车辆路径选择未能充分考虑 EV 的充电需求与配电网运行的影响, 可能导致交通运行成本过高; 配电网独立规划时, EV 的时空充电需求和灵活性调度潜力也难以准确计算^[6,10-11]。相比于交通-配电网独立规划的方法^[14-15], 二者的联合规划充分考虑了多设施之间的耦合关系, 并且基于多设施的协同运行, 达到降低系统总成本^[16]、减少 EV 随机出行和充电对交通-配电网的冲击^[17-18]、促进交通-配电网耦合系统经济高效运行等的目的^[19-20]。

在电动汽车的随机性调度的基础上, 目前已有部分针对交通-配电网联合规划的研究。文献[6]对交通网、配电网和二者耦合关系进行了建模, 改进了电动汽车驾驶区间约束, 建立了充电站、交通道路和配电线路的联合规划模型。文献[7]提出了基于车网互动的电动汽车充放电双层优化调度策略。文献[8]融合车主综合意愿的变功率 V2G 调度策略。文献[9]对电网与交通网两网耦合的关键基础设施及主要利益相关方进行分析, 着重对考虑两网耦合的设施规划和运行调控问题的研究现状进行归纳和总结。文献[16]将道路车辆分为有、无充电需求两类, 进而对交通-配电网中充电站、储能和线路(道路)进行了规划。文献[17]考虑了充电站等待时间对电动汽车流量的影响, 并建立了充电站和线路(道路)规划模型, 但未考虑燃油车的出行需求及其特性。针对灾害场景: 文献[19]提出了配电线路或交通道路随机故障时交通-配电网耦合系统的三层加固规划模型; 文献[20]提出了考虑各类车辆碳排放强度的交通-配电网联合规划方法, 在交通侧规划加氢站, 配电侧规划分布式电源。

上述研究均取得了一定的进展, 但在交通-配电网联合规划中未考虑 EV 和 GV 的实时能耗差异

对二者路径的影响, 可能导致电动汽车充电位置和充电需求达不到最优。

此外, 现有 E-SOP 的研究一般以 DG、储能系统及柔性负荷接入的主动配电网为研究对象^[21-23], 对 E-SOP 的容量和位置进行规划。这类方法侧重于研究 E-SOP 对分布式电源消纳的影响, 或 E-SOP 与储能的协同作用, 未考虑 E-SOP 接入下的交通-配电网联合规划和优化运行^[24-25], 导致规划成本过高。电动汽车急剧增加的充电需求也使得充电站的建设、交通-配电网的联合规划尤其重要。因此, 在新型交通-配电网耦合系统背景下, 需要研究 E-SOP 接入下的交通-配电网联合规划方法, 以提高电动汽车的渗透率, 实现低碳目标。

综上所述, 本文研究了混合交通流下计及 E-SOP 影响的交通-配电网联合规划方法。其中, 交通侧上层建立了道路和充电站容量配置模型, 下层基于 EV 和 GV 的实时能耗特性差异进行混合交通流分配; 配电侧上层建立了 DG、变电站、线路、充电站以及 E-SOP 等的容量配置模型, 下层不仅考虑了 E-SOP 的连续调控, 还实现了“源-网-站-储”的协同运行; 结合交通-配电网物理和“流量-功率”耦合约束进行联合规划。该模型作为交通-配电网耦合系统整体性的规划, 在合理的成本目标下实现其最优运行。

1 EV 和 GV 混合交通流分配模型

基于混合交通流分配模型来确定 EV 和 GV 的随机出行最优路径和 EV 充电需求。考虑二者的行驶时间和能耗等效成本^[26], 其路径选择成本为

$$p_{a,e} = c^e \tau_a x_{a,e} + m^e n_{a,e} x_{a,e} \quad (1)$$

$$p_{a,g} = c^g \tau_a x_{a,g} + m^g n_{a,g} x_{a,g} \quad (2)$$

式中: $p_{a,e}$ 和 $p_{a,g}$ 分别为 EV、GV 总运行成本; c^e 和 c^g 分别为 EV、GV 行驶时间成本, 满足 $c^e = c^g$; τ_a 为行驶时间; $x_{a,e}$ 和 $x_{a,g}$ 分别为 EV、GV 流量; m^e 和 m^g 分别为 EV、GV 能耗成本; $n_{a,e}$ 和 $n_{a,g}$ 分别为 EV、GV 对应的随机能耗值, 由车辆特性和交通网运行情况决定。

传统的道路行驶时间 τ_a 高度非线性且不能准确反映流量接近道路容量时行驶时间的变化^[6,10]。因此, 采用道路容量约束的对偶变量作为延迟惩罚因子, 则道路行驶时间函数^[6]为

$$\tau_a = \begin{cases} \tau_a^0, & x_a < c_a \\ \tau_a^0 + \lambda_a^*, & x_a = c_a \end{cases} \quad (3)$$

式中: τ_a^0 为自由流行驶时间; x_a 为道路流量; c_a 为

道路容量； λ_a^* 为道路容量约束的对偶变量。则混合交通流分配模型即交通网下层运行模型^[1,27]为

$$\min T_L = \sum_{a \in T_A} (p_{a,e} + p_{a,g}) \quad (4)$$

$$\text{s.t. } \forall k \in K, rs \in OD, a \in T_A$$

$$\sum_{k \in K} f_{k,e}^{rs} = q_e^{rs}, \omega_e^{rs} \quad (5)$$

$$\sum_{k \in K} f_{k,g}^{rs} = q_g^{rs}, \omega_g^{rs} \quad (6)$$

$$\sum_{rs \in OD} \sum_{k \in K} f_{k,e}^{rs} \delta_{a,k}^{rs} = x_{a,e}, \mu_{a,e} \quad (7)$$

$$\sum_{rs \in OD} \sum_{k \in K} f_{k,g}^{rs} \delta_{a,k}^{rs} = x_{a,g}, \mu_{a,g} \quad (8)$$

$$x_a = x_{a,e} + x_{a,g}, \mu_a \quad (9)$$

$$x_a \leq c_a, \lambda_a \quad (10)$$

$$f_{k,e}^{rs} \geq 0, \zeta_{k,e}^{rs} \quad (11)$$

$$f_{k,g}^{rs} \geq 0, \zeta_{k,g}^{rs} \quad (12)$$

$$\left(D_e - \sum_a n_{a,e} \delta_{a,k}^{rs} \right) f_{k,e}^{rs} \geq 0, \rho_k^{rs} \quad (13)$$

式中： T_L 为交通网运行目标函数； T_A 为道路集合； k 和 K 分别为可行路径和路径集合； r 和 s 分别为出行起止点；OD为出行需求； $f_{k,e}^{rs}$ 和 $f_{k,g}^{rs}$ 分别为OD对 (r,s) 之间路径 k 上的EV和GV流量； q_e^{rs} 和 q_g^{rs} 为出行需求量； $\delta_{a,k}^{rs}$ 为道路和路径关联参数，若OD对 (r,s) 的路径 k 包含道路 a ，则 $\delta_{a,k}^{rs}=1$ ，否则 $\delta_{a,k}^{rs}=0$ ； D_e 为EV的最大行驶里程，与电池容量有关； ω_e^{rs} 、 ω_g^{rs} 、 $\mu_{a,e}$ 、 $\mu_{a,g}$ 、 μ_a 、 $\zeta_{k,e}^{rs}$ 、 $\zeta_{k,g}^{rs}$ 和 ρ_k^{rs} 分别为对应约束的拉格朗日乘子。

混合交通流分配的拉格朗日函数^[27]见附录A。

令 $\varepsilon_{k,g}^{rs} = \mu_{a,g} \delta_{a,k}^{rs}$ 、 $\varepsilon_{k,e}^{rs} = \mu_{a,e} \delta_{a,k}^{rs}$ ，可以推导出

$$\omega_g^{rs} + \varepsilon_{k,g}^{rs} = 0, f_{k,g}^{rs} > 0 \quad (14)$$

$$\omega_g^{rs} + \varepsilon_{k,g}^{rs} < 0, f_{k,g}^{rs} = 0 \quad (15)$$

$$\omega_e^{rs} + \varepsilon_{k,e}^{rs} + \rho_k^{rs} \left(D_e - \sum_a n_{a,e} \delta_{a,k}^{rs} \right) = 0, f_{k,e}^{rs} > 0 \quad (16)$$

$$\omega_e^{rs} + \varepsilon_{k,e}^{rs} + \rho_k^{rs} \left(D_e - \sum_a n_{a,e} \delta_{a,k}^{rs} \right) < 0, f_{k,e}^{rs} = 0 \quad (17)$$

可以看出，交通流量大于零的路段，阻抗相同且均为最小综合成本 ω_g^{rs} 或 ω_e^{rs} ，交通流量等于零的路段，交通阻抗不小于最小综合成本 ω_g^{rs} 或 ω_e^{rs} 。

$\rho_k^{rs} \left(D_e - \sum_a n_{a,e} \delta_{a,k}^{rs} \right)$ 反映了EV超出驾驶区间的成本。式(14)一式(17)表明了下层模型最优解对应的交通分布符合Wardrop用户均衡准则。

2 E-SOP运行特性

为实现配电网中“源-网-站-储”的协同运行，将光伏(photovoltaic, PV)、充电站和E-SOP接入配

电网，其典型结构如图1所示。图1中： t 为运行时刻， $t \in T$ ； $P_{l',t}^{\text{SOP}}$ 和 $Q_{l',t}^{\text{SOP}}$ ($l' = i, l, v$)分别为SOP l' 变流器的有功、无功功率； P_t^{BES} 和 P_t^{BED} 分别为E-SOP储能充、放电功率。从图1可知，光伏、充电站和E-SOP分别接入配电网，相比于传统配电网，其功率流动更加灵活，运行方式多样，从而提高了设施的利用率^[25]。

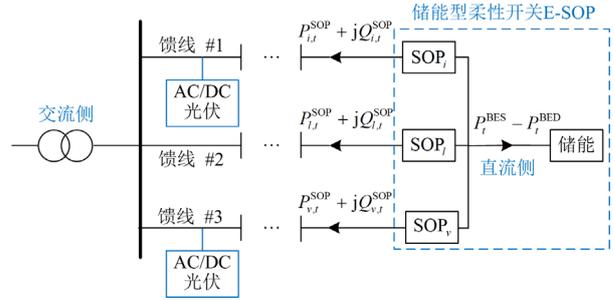


图1 含光伏、充电站和E-SOP的配电网结构图

Fig. 1 Schematic diagram of a distribution network equipped with PV, CS and E-SOP

E-SOP运行满足式(18)一式(21)的约束^[12-13]。

$$\begin{aligned} & (P_{d,c',t}^{\text{BES}} - P_{d,c',t}^{\text{BED}}) + P_{d,i,t}^{\text{SOP}} + P_{d,l,t}^{\text{SOP}} + P_{d,v,t}^{\text{SOP}} + \\ & P_{d,i,t}^{\text{SOP,L}} + P_{d,l,t}^{\text{SOP,L}} + P_{d,v,t}^{\text{SOP,L}} = 0 \end{aligned} \quad (18)$$

$$P_{d,l',t}^{\text{SOP,L}} = A_{l'}^{\text{SOP}} \sqrt{(P_{d,l',t}^{\text{SOP}})^2 + (Q_{d,l',t}^{\text{SOP}})^2}, l' = i, l, v \quad (19)$$

$$\sqrt{(P_{d,l',t}^{\text{SOP}})^2 + (Q_{d,l',t}^{\text{SOP}})^2} \leq (1 - \beta^{\text{SOP}}) S_{d,l'}^{\text{SOP}}, l' = i, l, v \quad (20)$$

$$-\mu_{l'} S_{d,l'}^{\text{SOP}} \leq Q_{d,l',t}^{\text{SOP}} \leq \mu_{l'} S_{d,l'}^{\text{SOP}}, l' = i, l, v \quad (21)$$

式中： d 为规划阶段； i 、 l 和 v 均为SOP接入节点；由于储能在E-SOP的直流侧，其接入位置用 c' 表示； $P_{d,c',t}^{\text{BES}}$ 和 $P_{d,c',t}^{\text{BED}}$ 分别为储能充、放电功率； $P_{d,l',t}^{\text{SOP}}$ 、 $P_{d,l',t}^{\text{SOP,L}}$ 和 $Q_{d,l',t}^{\text{SOP}}$ ($l' = i, l, v$)分别为SOP变流器的三端有功功率、有功损耗和无功功率； $A_{l'}^{\text{SOP}}$ 为损耗系数； $S_{d,l'}^{\text{SOP}}$ 为SOP变流器容量； β^{SOP} 为备用率系数，表示优化运行时SOP需要留有的功率调整裕度，一般取10%^[23]； $\mu_{l'}$ 为SOP无功功率约束系数。

E-SOP中储能的运行方式为

$$0 \leq P_{d,c',t}^{\text{BES}} \leq \delta_{d,c',t}^{\text{BES}} \bar{P}_{d,c',t}^{\text{BES}} \quad (22)$$

$$0 \leq P_{d,c',t}^{\text{BED}} \leq \delta_{d,c',t}^{\text{BED}} \bar{P}_{d,c',t}^{\text{BED}} \quad (23)$$

$$\delta_{d,c',t}^{\text{BES}} + \delta_{d,c',t}^{\text{BED}} \leq 1 \quad (24)$$

$$E_{d,c',t}^{\text{BE}} = E_{d,c',t-1}^{\text{BE}} + (\eta^{\text{BE}} P_{d,c',t}^{\text{BES}} - P_{d,c',t}^{\text{BED}} / \eta^{\text{BE}}) \Delta t \quad (25)$$

$$0 \leq E_{d,c',t}^{\text{BE}} \leq E_{d,c'}^{\text{BE}} \quad (26)$$

$$\{S_{d,l'}^{\text{SOP}}, E_{d,c'}^{\text{BE}}\} \in \arg \min D_U, \forall l' = i, l, v \quad (27)$$

式中: $\delta_{d,c',t}^{\text{BES}}$ 和 $\delta_{d,c',t}^{\text{BED}}$ 分别为储能充放电决策变量, 0-1 变量; $\bar{P}_{d,c',t}^{\text{BES}}$ 和 $\bar{P}_{d,c',t}^{\text{BED}}$ 分别为储能充、放电功率上限; $E_{d,c'}^{\text{BE}}$ 为储能容量; η^{BE} 为充放电效率; $E_{d,c'}^{\text{BE}}$ 为最大容量; D_U 为配电网上层多阶段配置模型的目标函数, $\arg \min D_U$ 为函数 D_U 达到最小时决策变量的取值。

式(27)表示 E-SOP 三端变流器和储能容量由配电网上层多阶段配置模型决策, 见式(32)。即根据 3.2 节配电网上层多阶段配置模型可以优化得到 $S_{d,l'}^{\text{SOP}}$ 和 $E_{d,c'}^{\text{SOP}}$, 进而作为运行时的容量上限决策 E-SOP 的有功、无功出力。

3 混合交通流下计及 E-SOP 影响的交通-配电网联合规划模型

为满足电动汽车的行驶和充电需求, 需要对交通网和配电网进行联合规划, 以减少电动汽车对二者运行的冲击。混合交通流下计及 E-SOP 影响的交通-配电网联合规划结构如图 2 所示。

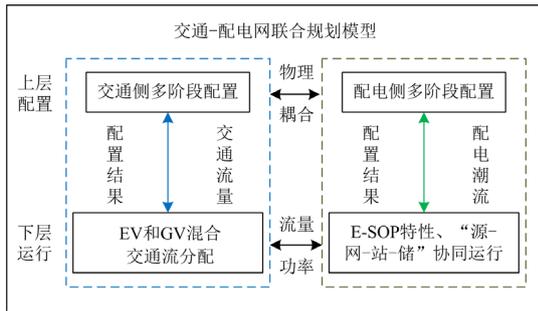


图 2 交通-配电网联合规划模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of transportation and distribution networks coordinated planning

如图 2 所示, 在混合交通流分配和 E-SOP 运行特性建模的基础上, 以交通-配电网各设施配置和运行总成本最小为目标, 以配置上下限、“源-网-站-储”协同运行和交通-配电网耦合关系等为约束, 建立交通-配电网联合规划模型。

3.1 混合交通流下的交通侧上层多阶段配置模型

交通网 $G_{\text{TN}} = \{T_N, T_A\}$, 其中 T_N 为交通网节点。考虑交通道路的扩容、充电站地理位置及充电桩数目, 建立交通网上层多阶段配置模型^[6,17]。

$$\min T_U = \sum_{d \in D} \sum_{a \in T_A} (C^R n_{d,a}^R + C^{\text{EVS}} \delta_{d,a}^{\text{EVS}} + C^{\text{EVL}} p_{d,a}^{\text{EVL}}) \quad (28)$$

s.t. $\forall d, \forall a$

$$c_{d,a} = \begin{cases} c_{d-1,a} + n_{d,a}^R \Delta c_{d,a}, \forall a \in T_A, d > 1 \\ c_a^0 + n_{d,a}^R \Delta c_{d,a}, \forall a \in T_A, d = 1 \end{cases} \quad (29)$$

$$\Delta c_{d,a} = w_c c_a^0 \quad (30)$$

$$n_{d,a}^R \leq n_{d,a}^R \leq \bar{n}_a^R, n_{d,a}^R \in \mathbb{Z}_+, a \in T_A \quad (31)$$

$$p_a^{\text{EVL}} \delta_{d,a}^{\text{EVS}} \leq p_{d,a}^{\text{EVL}} \leq \bar{p}_a^{\text{EVL}} \delta_{d,a}^{\text{EVS}} \quad (32)$$

式中: T_U 为交通网配置目标函数; D 为阶段总数; C^R 、 C^{EVS} 和 C^{EVL} 分别为道路、充电站和充电桩的规划成本; $n_{d,a}^R$ 、 $\delta_{d,a}^{\text{EVS}}$ 和 $p_{d,a}^{\text{EVL}}$ 分别为对应的决策变量; w_c 为扩容系数; c_a^0 为初始容量; 其余变量均为上下限。

结合第 1 节的混合交通流分配模型, 交通网规划模型可以概述为

$$\begin{cases} \min_{X,F} T_U(X) + T_L(X^*, F) \\ \text{s.t. } X(x_1, x_2, x_3) \in \Omega^{\text{TN}} \\ F \in \arg \min \{T_L(X^*, F) : F \in \Theta^{\text{TN}}\} \end{cases} \quad (33)$$

式中: X 为交通网配置决策变量, 包括道路扩容条数 x_1 、充电站位置 x_2 和充电桩数目 x_3 ; F 为交通网运行决策变量, 即混合交通流分配的决策变量; X^* 为 X 的取值; Ω^{TN} 和 Θ^{TN} 分别为配置和运行约束集合。

3.2 E-SOP 影响的配电网侧多阶段规划模型

1) 配电网侧上层多阶段配置模型

配电网为 $G_{\text{DN}} = \{D_N, D_A\}$, 其中 D_N 和 D_A 分别为配电网节点和其线路的集合。配电网上层配置模型的决策变量包括分布式电源、变电站、线路、充电站以及 E-SOP^[21,28-30]。

$$\begin{aligned} \min D_U = & \sum_d \sum_{i \in \Omega^{\text{PV}}} (C^{\text{PI}} z_{d,i}^{\text{PV}} + C^{\text{PV}} P_{d,i}^{\text{PV}} + C^{\text{PVX}} P_{d,i}^{\text{PVX}}) + \\ & \sum_{i \in \Omega^{\text{G}}} (C^{\text{GI}} z_{d,i}^{\text{G}} + C^{\text{G}} S_{d,i}^{\text{G}} + C^{\text{GX}} S_{d,i}^{\text{GX}}) + \\ & \sum_{i \in \Omega^{\text{L}}} C^{\text{L}} n_{d,i}^{\text{L}} + \sum_{i \in \Omega^{\text{NL}}} C^{\text{NL}} z_{d,i}^{\text{NL}} + \\ & \sum_{i \in \Omega^{\text{CS}}} (C^{\text{CI}} z_{d,i}^{\text{CS}} + C^{\text{CS}} P_{d,i}^{\text{CS}} + C^{\text{CSX}} P_{d,i}^{\text{CSX}}) + \\ & \sum_{l' \in \Omega^{\text{E-SOP}}} (C^{\text{SI}} z_{d,l'}^{\text{SOP}} + C^{\text{SOP}} S_{d,l'}^{\text{SOP}}) + \\ & \sum_{c' \in \Omega_{\text{iv}}^{\text{E-SOP}}} (C^{\text{EP}} P_{d,c'}^{\text{BE}} + C^{\text{ES}} E_{d,c'}^{\text{BE}}) \end{aligned} \quad (34)$$

式中: D_U 为目标函数, 即配电网各设施配置的综合成本; Ω^{PV} 、 Ω^{G} 、 Ω^{L} 、 Ω^{CS} 、 $\Omega^{\text{E-SOP}}$ 和 $\Omega_{\text{iv}}^{\text{E-SOP}}$ 分别为待选节点的集合; Ω^{NL} 为新增负荷点的待选线路集合, 且 Ω^{NL} 包含于 Ω^{L} ; $z_{d,i}^{\text{PV}}$ 为光伏新建决策变量; $P_{d,i}^{\text{PV}}$ 和 $P_{d,i}^{\text{PVX}}$ 分别为光伏新建和扩容功率; $z_{d,i}^{\text{G}}$ 、 $S_{d,i}^{\text{G}}$ 和 $S_{d,i}^{\text{GX}}$ 分别为变电站对应决策变量; $n_{d,i}^{\text{L}}$ 为线路扩容数目; $z_{d,i}^{\text{NL}}$ 为新增负荷点待选线路决策变量, 0-1 变量, 该变量也决定了配电网的拓扑结构; $z_{d,i}^{\text{CS}}$ 、 $P_{d,i}^{\text{CS}}$ 和 $P_{d,i}^{\text{CSX}}$ 分别为充电站对应决策变量; $z_{d,l'}^{\text{SOP}}$ 为

SOP 为新建决策变量, 0-1 变量; $S_{d,l'}^{\text{SOP}}$ 为 SOP 新建容量; $P_{d,c'}^{\text{BE}}$ 和 $E_{d,c'}^{\text{BE}}$ 分别为 SOP 对应的储能功率、容量; 其余变量为对应的成本。

该模型中, 目标函数包括光伏、变电站、线路、充电站和 E-SOP 投资成本; 约束条件包括各设施配置时容量和功率的上下限、充电需求以及多阶段耦合等约束^[24]。

$$\sum_i z_{d,i}^{\text{PV}} \leq \bar{z}_d^{\text{PV}}, \forall i \in \Omega^{\text{PV}} \quad (35)$$

$$\sum_{i \in \Omega^{\text{PV}}} z_{d,i}^{\text{PV}} (P_{d,i}^{\text{PV}} + P_{d,i}^{\text{PVX}}) \leq \xi^{\text{PV}} \sum_{i \in D_N} \bar{P}_{d,i}^{\text{L}} \quad (36)$$

$$n_{d,il}^{\text{L}} \in [\underline{n}_{d,il}^{\text{L}}, \bar{n}_{d,il}^{\text{L}}], n_{d,il}^{\text{L}} \in Z_+, \forall il \in \Omega^{\text{L}} \quad (37)$$

$$\sum_i z_{d,i}^{\text{G}} \leq \bar{z}_d^{\text{G}}, \forall i \in \Omega^{\text{G}} \quad (38)$$

$$\sum_{l'} z_{d,l'}^{\text{SOP}} \leq \bar{z}_d^{\text{SOP}}, \forall l' \in \Omega^{\text{E-SOP}} \quad (39)$$

$$S_{d,l'}^{\text{SOP}} = z_{d,l'}^{\text{SOP}} S_{d,l'}^{\text{SOP}}, \forall l' \in \Omega^{\text{E-SOP}} \quad (40)$$

$$0 \leq P_{d,c'}^{\text{BE}} \leq \bar{P}_{d,c'}^{\text{BE}}, \forall c' \in \Omega_{\text{th}}^{\text{E-SOP}} \quad (41)$$

$$0 \leq E_{d,c'}^{\text{BE}} \leq \bar{E}_{d,c'}^{\text{BE}}, \forall c' \in \Omega_{\text{th}}^{\text{E-SOP}} \quad (42)$$

$$P_{d,c'}^{\text{BE}} \leq \beta^{\text{BE}} E_{d,c'}^{\text{BE}}, \forall c' \in \Omega_{\text{th}}^{\text{E-SOP}} \quad (43)$$

式中: \bar{z}_d^{PV} 、 \bar{z}_d^{G} 和 \bar{z}_d^{SOP} 分别为光伏、变电站和 SOP 的最大安装数量; ξ^{PV} 为 PV 最大渗透率; $\bar{P}_{d,i}^{\text{L}}$ 为节点 i 处的最大负荷; $\bar{n}_{d,il}^{\text{L}}$ 和 $\underline{n}_{d,il}^{\text{L}}$ 分别为线路扩容范围上下限; $S_{d,ra}^{\text{SOP}}$ 为 SOP 的单位安装容量; $\Omega_{\text{th}}^{\text{E-SOP}}$ 为与 SOP_i 、 SOP_l 和 SOP_v 连接的直流侧储能集合; $\bar{P}_{d,c'}^{\text{BE}}$ 和 $\bar{E}_{d,c'}^{\text{BE}}$ 分别为储能功率、容量上限; β^{BE} 为其功率容量比。

2) 配电侧下层多阶段运行模型

配电网运行目标为出力成本最小, 包括光伏、变电站、线路、充电站、E-SOP 以及负荷需求响应成本^[23], 如式(44)所示。

$$\begin{aligned} \min D_L = & \sum_d \sum_t \left[\sum_{i \in \Omega^{\text{PV}}} (C^{\text{PM}} P_{d,i,t}^{\text{PV}} + C^{\text{PD}} P_{d,i,t}^{\text{PVD}}) + \right. \\ & \sum_{i \in \Omega^{\text{G}}} C^{\text{GM}} P_{d,i,t}^{\text{G}} + \sum_{il \in \Omega^{\text{L}}} C^{\text{LM}} n_{d,il}^{\text{L}} + \\ & \sum_{i \in \Omega^{\text{CS}}} (C^{\text{CSM}} P_{d,i,t}^{\text{CSS}} + C^{\text{CDM}} P_{d,i,t}^{\text{CSD}}) + \\ & \sum_{l' \in \Omega^{\text{E-SOP}}} C^{\text{SM}} P_{d,l',t}^{\text{SOP}} + \sum_{i \in \Omega^{\text{DM}}} C^{\text{DM}} P_{d,i,t}^{\text{DM}} + \\ & \left. \sum_{c' \in \Omega_{\text{th}}^{\text{E-SOP}}} (C^{\text{BSM}} P_{d,c',t}^{\text{BES}} + C^{\text{BDM}} P_{d,c',t}^{\text{BED}}) \right] \quad (44) \end{aligned}$$

配电网运行相关的约束为

$$\underline{P}^{\text{PV}} \leq P_{d,i,t}^{\text{PV}} \leq \bar{P}^{\text{PV}}, \forall i \in \Omega^{\text{PV}} \quad (45)$$

$$0 \leq P_{d,i,t}^{\text{PVD}} \leq \alpha_i^{\text{PV}} \bar{P}^{\text{PV}}, \forall i \in \Omega^{\text{PV}} \quad (46)$$

$$\sqrt{(P_{d,i,t}^{\text{G}})^2 + (Q_{d,i,t}^{\text{G}})^2} \leq z_{d,i}^{\text{G}} S_{d,i}^{\text{G}}, \forall i \in \Omega^{\text{G}} \quad (47)$$

$$\underline{P}^{\text{DM}} \leq P_{d,i,t}^{\text{DM}} \leq \bar{P}^{\text{DM}}, \forall i \in \Omega^{\text{DM}} \quad (48)$$

$$Q_{d,i,t}^{\text{DM}} = P_{d,i,t}^{\text{DM}} \tan \varphi^{\text{L}}, \forall i \in \Omega^{\text{DM}} \quad (49)$$

式中: D_L 为配电网总运行成本; $P_{d,i,t}^{\text{PV}}$ 、 $P_{d,i,t}^{\text{PVD}}$ 和 $P_{d,i,t}^{\text{G}}$ 分别为光伏出力、弃光功率和变电站有功功率; $P_{d,i,t}^{\text{CSS}}$ 和 $P_{d,i,t}^{\text{CSD}}$ 分别为充电站充、放电功率; $P_{d,i,t}^{\text{DM}}$ 为需求响应负荷; C^{PM} 、 C^{PD} 、 C^{GM} 和 C^{LM} 分别为对应运行成本; C^{CSM} 、 C^{CDM} 、 C^{SM} 、 C^{DM} 、 C^{BSM} 和 C^{BDM} 分别为充电站充放电、SOP 运行、需求响应和储能充放电成本; \bar{P}^{PV} 和 $\underline{P}^{\text{PV}}$ 分别为光伏出力上下限; α_i^{PV} 为节点 i 处光伏最大有功切除比例, 即弃光率, 一般不超过 10%^[23]; $Q_{d,i,t}^{\text{G}}$ 为变电站的无功功率; \bar{P}^{DM} 和 $\underline{P}^{\text{DM}}$ 分别为需求响应负荷上下限^[30]; $Q_{d,i,t}^{\text{DM}}$ 为需求响应无功负荷; φ^{L} 为负荷节点功率因数角。

针对配电网中多种负荷参与需求响应的场景, 考虑需求响应能力的上下限约束, 采用激励型策略, 即负荷聚合商根据预测的电价, 以自身收益最大化为目标, 优化需求响应的时段和容量, 代表用户参与电力市场投标, 并从中获得收益; 用户基于负荷聚合商公布的需求响应补贴价格, 决定最优响应电量来最大化收益, 并在合同规定的时段内减少用电量或改变用电时间, 从而获得相应的补偿^[31-32]。因此, 在“源-网-站-储”协同运行、主动管理措施和 E-SOP 接入下, 配电网潮流^[25]为

$$\sum_{v \in \Psi_{U,j}} \alpha_{d,vi}^{\text{L}} (P_{d,vi,t} - R_{vi} L_{d,vi,t}) = \sum_{l \in \Psi_{L,j}} \alpha_{d,il}^{\text{L}} P_{d,il,t} + P_{d,i,t}^{\text{inj}} \quad (50)$$

$$\sum_{v \in \Psi_{U,j}} \alpha_{d,vi}^{\text{L}} (Q_{d,vi,t} - X_{vi} L_{d,vi,t}) = \sum_{l \in \Psi_{L,j}} \alpha_{d,il}^{\text{L}} Q_{d,il,t} + Q_{d,i,t}^{\text{inj}} \quad (51)$$

当 $\alpha_{d,il}^{\text{L}} = 1$ 时, 下面约束成立。

$$U_{d,i,t} = U_{d,i,t} - (R_{il} P_{d,il,t} + X_{il} Q_{d,il,t}) / [U_0 (1 + n_{d,il}^{\text{L}})] \quad (52)$$

$$L_{d,il,t} U_{d,i,t} - P_{d,il,t}^2 - Q_{d,il,t}^2 = 0 \quad (53)$$

$$-(1 + n_{d,il}^{\text{L}}) \bar{P}_{d,il,t} \leq P_{d,il,t} \leq (1 + n_{d,il}^{\text{L}}) \bar{P}_{d,il,t} \quad (54)$$

$$\underline{U}_{d,i,t} \leq U_{d,i,t} \leq \bar{U}_{d,i,t} \quad (55)$$

$$P_{d,i,t}^{\text{inj}} = P_{d,i,t}^{\text{G}} + P_{d,i,t}^{\text{SOP}} + P_{d,i,t}^{\text{PV}} + P_{d,i,t}^{\text{CSS}} - P_{d,i,t}^{\text{CSD}} - P_{d,i,t}^{\text{L}} + P_{d,i,t}^{\text{DM}} \quad (56)$$

$$Q_{d,i,t}^{\text{inj}} = Q_{d,i,t}^{\text{G}} + Q_{d,i,t}^{\text{SOP}} - Q_{d,i,t}^{\text{L}} + Q_{d,i,t}^{\text{DM}} \quad (57)$$

式中: $\alpha_{d,il}^{\text{L}}$ 为线路连接状态变量, 0-1 变量; $P_{d,il,t}$ 和 $Q_{d,il,t}$ 分别为支路 il 的有功、无功功率; R_{il} 和 X_{il} 分别为电阻和电抗; $P_{d,i,t}^{\text{inj}}$ 和 $Q_{d,i,t}^{\text{inj}}$ 分别为节点 i 注入的有功、无功功率; $\Psi_{U,i}$ 和 $\Psi_{L,i}$ 分别为节点 i 的上、下游关关节点集合; $L_{d,il,t}$ 为线路 il 电流的平方; $U_{d,i,t}$ 为节点电压; U_0 为电压基准值; $\bar{P}_{d,il,t}$ 为最大有功功

率; $\bar{U}_{d,i,t}$ 和 $\underline{U}_{d,i,t}$ 分别为电压上、下限; $Q_{d,i,t}^L$ 为常规负荷的无功功率。

3.3 交通-配电网联合规划模型

假定交通道路和配电网节点耦合, 则交通-配电网耦合关系可以分为物理耦合和“流量-功率”耦合^[6,10]。

$$\delta_{d,a}^{EVS} = z_{d,i}^{CS} \omega_{i,a} \quad (58)$$

$$P_{d,i}^{CS} + P_{d,i}^{CSX} \leq x_{a,e}^c \bar{P}^{EV} P_{d,a}^{EVL} \quad (59)$$

$$\eta^{CS} = x_{a,e}^c / x_{a,e}, x_{a,e} = x_{a,e}^c + x_{a,e}^{ds}, \forall a \quad (60)$$

$$P_{d,i,t}^{CSS} = \eta^{CS} \sum_{a \in \rho_i} \delta_{d,a}^{EVS} x_{a,e}, \forall a \quad (61)$$

式中: $\omega_{i,a}$ 为交通道路和配电网节点耦合矩阵 ω 元素, ω 为 $i \times a$ 的变量 0-1 矩阵; $x_{a,e}^c$ 和 \bar{P}^{EV} 分别为有充电需求的 EV 数量和最大充电功率; η^{CS} 为可调度 EV 占比^[6]; $x_{a,e}^{ds}$ 为无充电需求的 EV 数量, 在充电行为上相当于 GV, 但考虑到实时能耗的随机波动, 其特性与 GV 略有区别; ρ_i 表示与充电站 i 关联的道路集合, 如式(62)所示。

$$\rho_i = \{1, 2, \dots, a, \dots, T_A\}, \forall i \quad (62)$$

基于式(58)一式(62)的交通-配电网耦合约束, 结合交通网多阶段规划和配电网多阶段规划模型, 形成了交通-配电网联合规划模型。

由于二阶锥潮流中功率与电压关系、待选线路与线路扩容以及 E-SOP 损耗计算等非线性约束的引入, 导致交通-配电网联合规划模型为混合整数非线性规划问题。对其进行线性化, 详细过程见附录 A 式(A7)一式(A18), 则联合规划模型转换为混合整数二阶锥规划形式, 表述为

$$\begin{cases} \sum_{X,F,U,L} T_U + T_L + D_U + D_L \\ \text{s.t. Cons - TN} = \{\text{式(5)一式(17), 式(29)一式(32)}\} \\ \text{Cons - DN} = \left\{ \begin{array}{l} \text{式(18)一式(27), 式(35)一式(43),} \\ \text{式(45)一式(57)} \end{array} \right\} \\ \text{Cons - CN} = \{\text{式(58)一式(62)}\} \end{cases} \quad (63)$$

式中: X 、 F 、 U 和 L 分别为交通网配置、运行、配电网配置和运行的决策变量; TN 为交通网有关约束; DN 为配电网有关约束; CN 为耦合约束。经过线性化后的联合规划模型可由 Gurobi 软件直接求解。

4 算例分析

4.1 测试系统和数据

使用 Sioux Falls 交通网^[33]和改进的 IEEE 69 节点^[34]配电网组成的耦合系统进行测试; 测试的交

通-配电网耦合系统结构、容量参数以及规划成本等见附录 B; 假定规划年限为 8 年, 2 年为一个规划周期, 一共 4 个阶段; 涉及的随机变量包括车辆出行需求、光伏出力和常规负荷, 针对这三类不确定性变量, 采用蒙特卡洛抽样和 Copula 函数等多种方法进行建模^[35], 以选取典型场景进行规划, 见附录 B; 程序在 Matlab R2017b 环境下通过 Yalmip 平台调用 Gurobi 求解器对模型进行求解, 系统硬件环境为 i5-7500U CPU 3.40 GHz, 8 GB 内存, 单次求解时间为 11.54 h。

4.2 交通-配电网联合规划结果分析

混合交通流下计及 E-SOP 影响的交通-配电网联合规划结果如表 1、表 2、图 3 和附录 B 所示。

表 1 变电站和 E-SOP 配置结果

配置结果	阶段 1—4
变电站数目	1
变电站有功容量/MW	20
E-SOP 数目	2
SOP 有功容量/MW	5
SOP 无功容量/Mvar	5
储能最大充放电功率/MW	1
储能容量/MWh	5

表 2 光伏多阶段规划结果

节点序号	功率/MW			
	阶段 1	阶段 2	阶段 3	阶段 4
3	0	0	0	13.30
17	19.97	0	0	0
47	0	0	20.60	0
53	5.81	0	0	10.46
57	0	0	0	18.23
65	0	2.78	6.08	0
新建光伏电站数目	2	1	1	2

从表 1 和表 2 可知: 随着不同规划阶段电动汽车充电需求和负荷的增加, 变电站由于容量限制, 需要新建更多的光伏机组来满足系统功率平衡, 这也与当下分布式电源为主体的配电网发展趋势相一致; 4 个阶段累计的新建光伏容量为 97.23 MW。

部分交通网道路和配电网线路的具体位置和扩建数目如图 3 所示。图 3 中, 4 个规划阶段道路总扩容条数分别为 45、16、0、5, 线路总扩容条数分别为 0、2、11、7。从图 3 可知: Sioux Falls 网络初始道路容量较小, 因而在规划时需要扩建较多的道路以满足车辆出行需求; EV、GV 总出行需求在不同规划阶段基本保持一致, 但 EV 数量随着规划

阶段而增加。因此，交通网道路扩建以阶段 1 为主，而配电网线路扩建则随着充电需求而增加，故阶段 3 和阶段 4 扩容条数较多。充电站和负荷点的规划结果见附录 B。

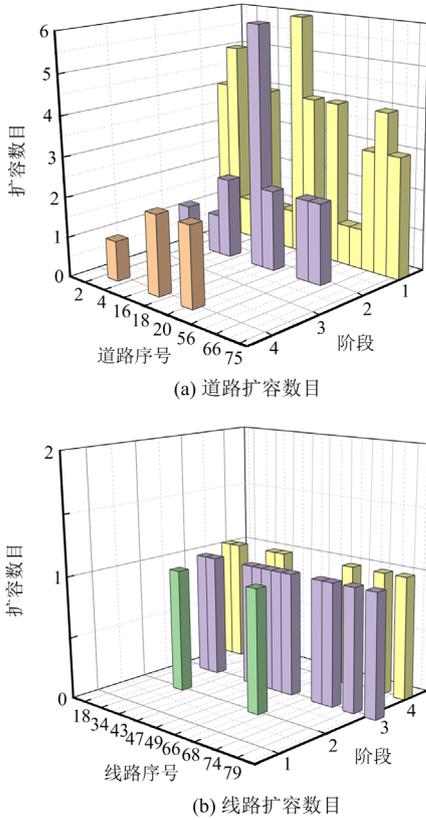


图 3 不同规划阶段道路和线路扩容数目
Fig. 3 Road and distribution line expansion numbers at different planning stages

4.3 交通-配电网联合规划与独立规划对比

设定两个对比算例分析联合规划对规划总成本和各设施数量影响，Case 1：交通-配电网联合规划(本文模型)；Case 2：先交通网规划，确定充电站位置和充电桩数目后进行配电网规划。Case 1 和 Case 2 的对比结果如表 3 所示。

表 3 考虑联合规划对规划结果的影响

Table 3 Results of transportation and distribution networks coordinated planning

规划结果	Case1	Case 2
道路扩容总数	66	66
交通网规划		
充电站/个	6	6
充电桩/个	250	329
配电网规划		
充电容量/MW	22.5	28.35
线路扩容总数	20	38
光伏电站容量/MW	97.23	96.92
总成本/元	7.21×10^{12}	7.77×10^{12}

从表 3 可知：先对交通网进行规划，确定充电站位置和充电桩数目，再对配电网进行规划，由于电动汽车充电功率未进行优化，过高估计了充电负荷，导致充电桩数目较多，配电网规划时线路扩容数量也有所增加，总成本也过高。相比于独立规划，联合规划的总成本减少了 7.21%。两种规划方法的光伏电站容量相差不大；并且交通道路扩容由混合交通流决定，与出行需求有关。

4.4 E-SOP 接入对配电网的影响分析

设定两个对比算例分析 E-SOP 接入对配电网运行的影响，如表 4 所示。Case 3：不考虑 E-SOP 接入的配电网运行；Case 4：E-SOP 接入的配电网运行(本文模型)。

表 4 E-SOP 接入对配电网无功的影响

Table 4 Reactive power comparison with E-SOP

	无功出力			
	阶段 1	阶段 2	阶段 3	阶段 4
Case 3	16.62	16.62	16.62	16.62
Case 4	10.60	12.34	13.20	12.70

从表 4 可知：E-SOP 接入后配电网的无功电源需求较低，且对比 Case 3 和 Case 4，其无功出力最大差距为 6.02 Mvar；无功电源的出力与 E-SOP 的调控和无功负荷等有关，不同的 E-SOP 运行状态下，其无功出力也有差异；E-SOP 的调控对节点电压有一定影响，如图 4 所示。

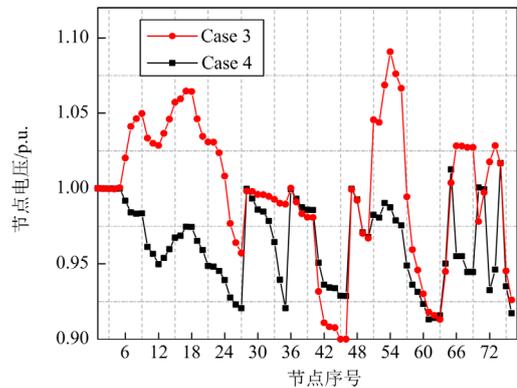


图 4 E-SOP 接入对节点电压的影响
Fig. 4 Node voltage fluctuates considering the integration of E-SOP

从图 4 可知：E-SOP 接入后的配电网节点电压波动范围小于 E-SOP 未接入时，说明了 E-SOP 接入可以调节耦合系统的潮流。

明显地，E-SOP 的容量和运行状态对交通-配电网联合规划产生了一定的影响。为进一步刻画 E-SOP 的无功容量对配电网无功电源的影响，图 5

对 E-SOP 不同无功容量进行灵敏度分析。

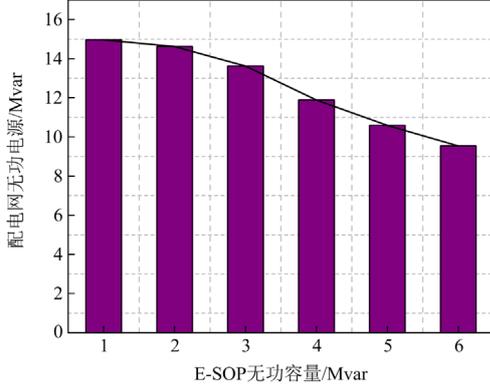


图5 E-SOP 无功容量对配电网无功电源的影响

Fig. 5 Reactive power changed with the capacity of E-SOP

从图5可知:随着E-SOP无功容量的增加,可以补偿配电网中无功功率,降低了配电网的无功成本,减少了对配电网无功电源的需求。

5 结论

本文在交通-配电网深度耦合的背景下,建立了混合交通流下计及E-SOP影响的交通-配电网联合规划模型。其中:交通侧上层配置道路和充电站,下层为EV和GV混合交通流模型;配电侧上层配置DG、变电站、线路、充电站和E-SOP等,下层结合E-SOP运行特性,建立了“源-网-站-储”协同运行模型。最后,基于交通-配电网耦合约束,利用二阶锥松弛的线性化方法进行了整体优化求解。

对Sioux Falls交通网和IEEE 69节点配电网组成的耦合系统进行算例分析,得出考虑混合交通流、E-SOP接入和“源-网-站-储”运行后得到了合理的交通-配电网联合规划结果。与独立规划相比,交通-配电网联合规划总成本减少了7.21%。E-SOP接入能减少配电网无功电源(约6.02 Mvar),电压波动也较小。此外,随着E-SOP无功容量的增加,无功电源的减少较为明显。

在后续研究中,可以建立需求响应的不确定性模型,以及采用多种分层分布式算法对交通-配电网联合规划模型进行求解,进一步提高交通-配电网联合规划模型的实用性和求解效率。

附录A 模型转换过程

混合交通流的拉格朗日函数 \mathcal{L} 为

$$\mathcal{L} = \sum_{a \in I_A} (p_{a,g} + p_{a,e}) - \sum_{rs \in OD} \omega_g^{rs} \left(\sum_{k \in K} f_{k,g}^{rs} - q_g^{rs} \right) - \sum_{rs \in OD} \omega_c^{rs} \left(\sum_{k \in K} f_{k,e}^{rs} - q_c^{rs} \right) - \sum_{a \in I_A} \mu_{a,g} \left(\sum_{rs \in OD} \sum_{k \in K} f_{k,g}^{rs} \delta_{a,k}^{rs} - x_{a,g} \right) -$$

$$\sum_{a \in I_A} \mu_{a,e} \left(\sum_{rs \in OD} \sum_{k \in K} f_{k,e}^{rs} \delta_{a,k}^{rs} - x_{a,e} \right) - \sum_{a \in I_A} \mu_a (x_a - x_{a,g} - x_{a,e}) - \sum_{a \in I_A} \lambda_a (c_a - x_a) - \sum_{rs \in OD} \sum_{k \in K} \zeta_{k,g}^{rs} f_{k,g}^{rs} - \sum_{rs \in OD} \sum_{k \in K} \zeta_{k,e}^{rs} f_{k,e}^{rs} - \rho_k^{rs} \sum_{rs \in OD} \sum_{k \in K} (D_e - \sum_a n_{a,e} \delta_{a,k}^{rs}) f_{k,e}^{rs} \quad (A1)$$

$$\partial \mathcal{L} / \partial f_{k,g}^{rs} = \omega_g^{rs} + \mu_{a,g} \delta_{a,k}^{rs} + \zeta_{k,g}^{rs} = 0 \quad (A2)$$

$$\partial \mathcal{L} / \partial f_{k,e}^{rs} = \omega_c^{rs} + \mu_{a,e} \delta_{a,k}^{rs} + \rho_k^{rs} (D_e - \sum_a n_{a,e} \delta_{a,k}^{rs}) + \zeta_{k,e}^{rs} = 0 \quad (A3)$$

$$\partial \mathcal{L} / \partial x_{a,g} = c^g \tau_a + m^g n_{a,g} + \mu_{a,g} + \mu_a = 0 \quad (A4)$$

$$\partial \mathcal{L} / \partial x_{a,e} = c^e \tau_a + m^e n_{a,e} + \mu_{a,e} + \mu_a = 0 \quad (A5)$$

$$\partial \mathcal{L} / \partial x_a = \lambda_a - \mu_a = 0 \quad (A6)$$

首先将式(53)进行二阶锥松弛,表示为

$$\| [2P_{d,il,t} \quad 2Q_{d,il,t} \quad L_{d,il,t} \quad -U_{d,il,t}]^T \|_2 \leq L_{d,il,t} + U_{d,il,t} \quad (A7)$$

将式(19)中的SOP有功损耗约束进行二阶锥松弛,得到式(A8)所示的二阶锥形式约束。

$$\| [P_{d,l',t}^{\text{SOP}} \quad Q_{d,l',t}^{\text{SOP}}]^T \|_2 \leq 2 \frac{P_{d,l',t}^{\text{SOP,L}}}{\sqrt{2} A_r^{\text{SOP}}} \frac{P_{d,l',t}^{\text{SOP,L}}}{\sqrt{2} A_r^{\text{SOP}}}, l' = i, l, v \quad (A8)$$

此外,线路扩容导致线路的阻抗参数变化,故式(52)中的 $n_{d,il}^L$ 线性化为二进制变量之和,表示为

$$n_{d,il}^L = \sum_u z_{d,il,u}^L, u = 1, 2, \dots, N_{d,il}^L \quad (A9)$$

$$n_{d,il}^L = \begin{cases} n_{1,il}^{\text{SL}}, n = 1 \\ n_{1,il}^{\text{SL}} + n_{2,il}^{\text{SL}} + \dots + n_{n,il}^{\text{SL}}, n \geq 2 \end{cases} \quad (A10)$$

式中: $z_{d,il,u}^L$ 为0-1变量, $z_{d,il,u}^L = 1$ 时表示扩容第 u 条线路; $N_{d,il}^L$ 为线路最大并联数。需要注意的是, $n_{d,il}^{\text{SL}}$ 为阶段 d 线路 il 的扩容变量, $n_{d,il}^L$ 为前 d 阶段(包括阶段 d)的累计扩容量。引入辅助变量,令 $\xi_{d,il,u}^{\text{L1}} = U_{d,l,t} z_{d,il,u}^{\text{L1}}$, $\xi_{d,il,t}^{\text{L2}} = U_{d,il,t} z_{d,il,u}^{\text{L2}}$,则式(52)转化为

$$U_{d,l,t} + \sum_u \xi_{d,il,t}^{\text{L1}} = U_{d,l,t} + \sum_u \xi_{d,il,t}^{\text{L2}} - (R_{il} P_{d,il,t} + X_{il} Q_{d,il,t}) / U_0$$

$$0 \leq \xi_{d,il,u}^{\text{L1}} \leq \bar{U}_{d,l,t} z_{d,il,u}^{\text{L1}}, 0 \leq U_{d,l,t} - \xi_{d,il,u}^{\text{L1}} \leq \bar{U}_{d,l,t} (1 - z_{d,il,u}^{\text{L1}})$$

$$0 \leq \xi_{d,il,u}^{\text{L2}} \leq \bar{U}_{d,il,t} z_{d,il,u}^{\text{L2}}, 0 \leq U_{d,il,t} - \xi_{d,il,u}^{\text{L2}} \leq \bar{U}_{d,il,t} (1 - z_{d,il,u}^{\text{L2}}) \quad (A11)$$

式(A11)为节点电压的线性化约束。式(52)一式(56)为新增负荷点、待选线路以及线路扩容后的潮流方程。由于潮流方程非线性,且待选线路和扩容耦合,通过大M法和线性化DistFlow方程可以转化为

$$\sum_{v \in \mathcal{V}_{L,j}} (P_{d,vi,t} - R_{vi} L_{d,vi,t}) = \sum_{l \in \mathcal{V}_{L,j}} P_{d,il,t} + P_{d,i,t}^{\text{inj}} \quad (A12)$$

$$\sum_{v \in \Psi_{U,j}} (Q_{d,vi,t} - X_{vi} L_{d,vi,t}) = \sum_{l \in \Psi_{L,j}} Q_{d,il,t} + Q_{d,i,t}^{inj} \quad (A13)$$

$$U_{d,i,t} + \sum_u \xi_{d,il,u}^{L2} - (U_{d,i,t} + \sum_u \xi_{d,il,u}^{L1}) \geq (R_{il} P_{d,il,t} + X_{il} Q_{d,il,t}) / U_0 - M(1 - \alpha_{d,il}^L) \quad (A14)$$

$$U_{d,i,t} + \sum_u \xi_{d,il,u}^{L2} - (U_{d,i,t} + \sum_u \xi_{d,il,u}^{L1}) \leq (R_{il} P_{d,il,t} + X_{il} Q_{d,il,t}) / U_0 + M(1 - \alpha_{d,il}^L) \quad (A15)$$

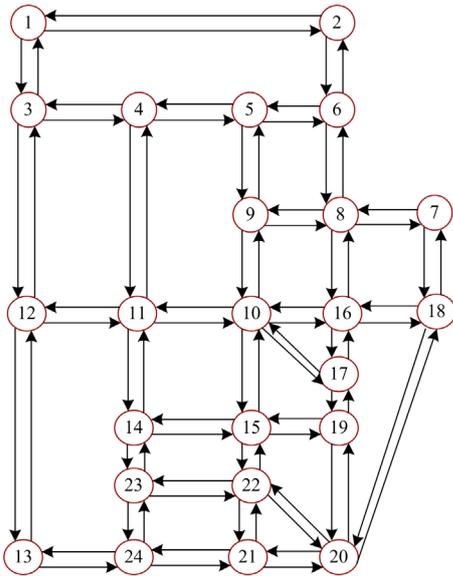
$$-(\alpha_{d,il}^L + N_{d,il}^L) \bar{P}_{d,il,t} \leq P_{d,il,t} \leq (\alpha_{d,il}^L + N_{d,il}^L) \bar{P}_{d,il,t} \quad (A16)$$

$$-\alpha_{d,il}^L \bar{Q}_{d,il,t} \leq Q_{d,il,t} \leq \alpha_{d,il}^L \bar{Q}_{d,il,t} \quad (A17)$$

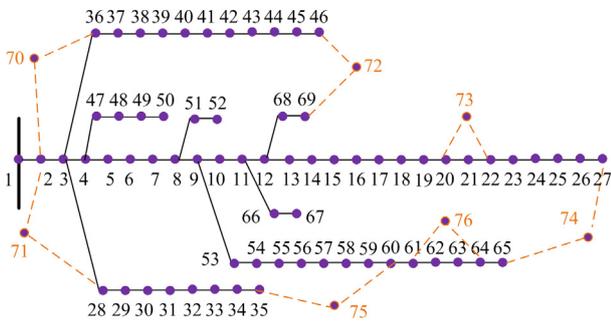
$$0 \leq N_{d,il}^L \leq M \alpha_{d,il}^L, 0 \leq N_{d,il}^L - n_{d,il}^L \leq M(1 - \alpha_{d,il}^L) \quad (A18)$$

式中： $N_{d,il}^L$ 为非线性变量， $N_{d,il}^L = \alpha_{d,il}^L n_{d,il}^L$ ，即待选线路和扩容的耦合约束； M 为大数。式(A18)为 $N_{d,il}^L$ 的线性化约束。

附录 B 模型参数及算例结果



(a) Sioux Falls交通网示意图



(b) 改进的IEEE 69节点配电网示意图

图 B1 待规划的交通-配电网耦合系统

Fig. B1 Transportation and distribution test networks for coordinated planning

新建的负荷点为 Node {70, 71, 72, 73, 74, 75, 76}, 对应建设线路为 Line {69, 71, 74, 75, 77, 79, 82}。

表 B1 新增负荷点距已有节点距离

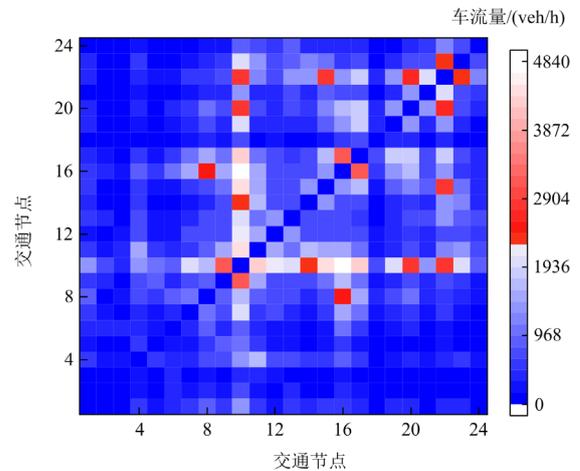
Table B1 Length of new loads to the distribution network

起始节点	终止节点	距离/km	起始节点	终止节点	距离/km	起始节点	终止节点	距离/km
2	70	4	69	72	3	35	75	2
36	70	3	20	73	2	59	75	3.5
2	71	5	22	73	2	61	76	1
28	71	4	27	74	2.5	63	76	2
46	72	2	65	74	2.5	—	—	—

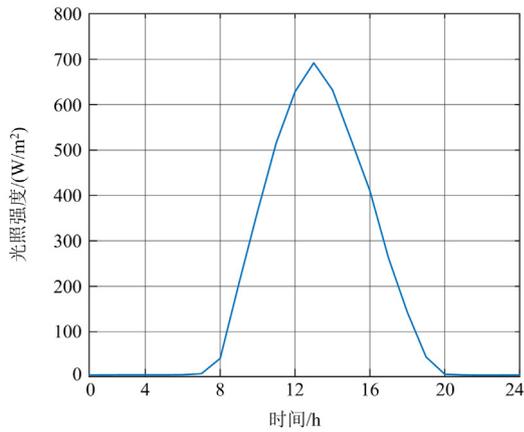
表 B2 交通-配电网联合规划相关参数^[23]

Table B2 Related parameters of transportation and distribution networks coordinated planning

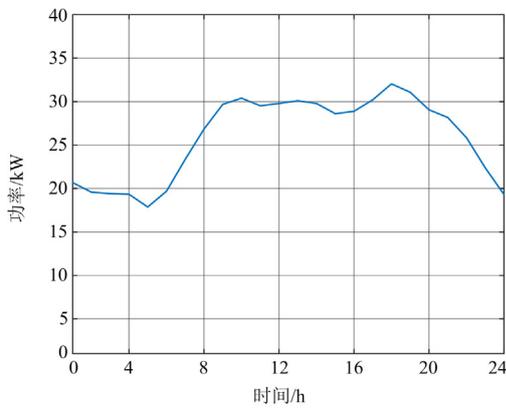
参数	数值	参数	数值
贴现率 r	0.06	变电站新建费用/万元	800
变电站容量成本/(万元/MVA)	23.78	变电站维护成本/(万元/年)	1.5
线路投资成本/(万元/km)	2.45	线路年运维成本/(元/条)	3000
需求响应成本/(元/kWh)	7	DG 投资费用/(元/kW)	4300
DG 扩容费用/(元/kW)	4300	DG 弃光惩罚成本/(元/kW)	0.42
DG 最大渗透率	90%	充电站充放电效率	0.9
DG 运维成本/(元/kWh)	0.24	SOP 投资费用/(元/kVA)	1000
SOP 损耗系数	0.02	SOP 维护费用系数	0.01
SOP 的使用年限	20	储能的使用年限	20
储能单位容量费用/(元/kWh)	400	储能维护费用系数	0.01



(a) 车辆出行需求



(b) 典型光伏场景



(c) 典型常规负荷场景

图 B2 交通-配电网联合规划场景

Fig. B2 Scenarios of transportation and distribution networks coordinated planning

从表 B3 和表 B4 可知: 4 个阶段累计的新建充电站为 6 个, 累计充电桩数目为 250 个, 累计容量为 22.5 MW。由于每个阶段车辆出行的 O-D 对相同, 则充电站的位置没有明显变化。随着 EV 的增加和 GV 的减少, 在每个阶段充电桩数目都有新增, 以满足充电需求。

表 B3 交通网中充电站多阶段规划结果

Table B3 Multistage planning results of charging stations in the transportation network

道路序号	充电桩数/个			
	阶段 1	阶段 2	阶段 3	阶段 4
2	3	2	19	21
4	8	7	18	38
19	10	7	18	38
52	1	0	0	0
60	2	5	8	18
66	1	1	12	13
累计新建充电桩数/个	25	22	75	128

表 B4 配电网中充电站多阶段规划结果

Table B4 Multistage planning results of charging stations in the distribution network

节点序号	充电功率/MW			
	阶段 1	阶段 2	阶段 3	阶段 4
2	0.27	0.18	1.71	1.89
4	0.72	7	18	38
19	0.90	7	18	38
52	0.09	0	0	0
60	0.18	5	8	18
66	0.09	1	12	13
累计新建充电容量/MW	2.25	1.98	6.75	11.52

参考文献

[1] WANG Jian, PEETA S, HE Xiaozheng. Multiclass traffic assignment model for mixed traffic flow of human-driven vehicles and connected and autonomous vehicles[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2019, 126: 139-168.

[2] 裴振坤, 王学梅, 康龙云. 电动汽车参与电网辅助服务的控制策略综述[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(18): 17-32.

PEI Zhenkun, WANG Xuemei, KANG Longyun. Review on control strategies for electric vehicles participating in ancillary services of power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(18):17-32.

[3] 石立国, 李延真, 关雪琳, 等. 电动汽车充电桩与分布式电源多阶段协同规划方法[J]. 供用电, 2022, 39(5): 33-40, 53.

SHI Liguog, LI Yanzhen, GUAN Xuelin, et al. Combined multi-stage planning method of EV charging piles and distributed generations[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(5): 33-40, 53.

[4] 陈浩, 胡俊杰, 袁海峰, 等. 计及配电网拥塞的集群电动汽车参与二次调频方法研究[J]. 中国电力, 2021, 54(12): 162-169.

CHEN Hao, HU Junjie, YUAN Haifeng, et al. Research on supplementary frequency regulation with aggregated electric vehicles considering distribution network congestion[J]. Electric Power, 2021, 54(12): 162-169.

[5] 余子淳, 范宏, 夏世威. 计及电动公交车 V2 G 响应的区域综合能源系统两阶段优化调度[J]. 中国电力, 2022, 55(7): 179-192.

YU Zichun, FAN Hong, XIA Shiwei. Two-stage optimal scheduling of regional integrated energy system considering V2 G response of electric buses[J]. Electric Power, 2022, 55(7): 179-192.

[6] WANG Xu, SHAHIDEHPOUR M. Coordinated planning

- strategy for electric vehicle charging stations and coupled traffic-electric networks[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(1): 268-279.
- [7] 肖丽, 谢尧平, 胡华锋, 等. 基于 V2G 的电动汽车充放电双层优化调度策略[J]. *高压电器*, 2022, 58(5): 164-171.
XIAO Li, XIE Yaoping, HU Huafeng, et al. Two-level optimization scheduling strategy for EV's charging and discharging based on V2G[J]. *High Voltage Apparatus*, 2022, 58(5): 164-171.
- [8] 聂昕磊, 樊艳芳. 融合车主综合意愿的变功率 V2G 调度策略[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2022, 43(3): 92-98.
NIE Xinlei, FAN Yanfang. Variable-power V2G dispatching strategy integrating comprehensive will of car owners[J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2022, 43(3): 92-98.
- [9] 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.
- [10] WANG Siyuan, BO Rui. Joint planning of electricity transmission and hydrogen transportation networks[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2022, 58(2): 2887-2897.
- [11] 廖鑫, 李婧, 徐佳, 等. 基于 MDP 及激励需求响应的电动汽车有序充电控制[J]. *电力科学与技术学报*, 2021, 36(5): 79-86.
LIAO Xin, LI Jing, XU Jia, et al. Research on coordinated charging control for electric vehicles based on MDP and incentive demand response[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2021, 36(5): 79-86.
- [12] 宋毅, 孙充勃, 李鹏, 等. 基于智能软开关的有源配电网供电恢复方法[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(15): 4390-4398, 4639.
SONG Yi, SUN Chongbo, LI Peng, et al. SOP based supply restoration method of active distribution networks using soft open point[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(15): 4390-4398, 4639.
- [13] CAO Wanyu, WU Jianzhong, JENKINS N, et al. Operating principle of soft open points for electrical distribution network operation[J]. *Applied Energy*, 2016, 164: 245-257.
- [14] 孔顺飞, 胡志坚, 谢仕炜, 等. 含电动汽车充电站的主动配电网二阶段鲁棒规划模型及其求解方法[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(5): 1093-1105.
KONG Shunfei, HU Zhijian, XIE Shiwei, et al. Two-stage robust planning model and its solution algorithm of active distribution network containing electric vehicle charging stations[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(5): 1093-1105.
- [15] 伍也凡, 刘浩田, 肖振锋, 等. 考虑源-网-荷不确定性的增量配电网规划研究综述[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(8): 177-187.
WU Yefan, LIU Haotian, XIAO Zhenfeng, et al. Review of incremental distribution network planning considering the uncertainty of source-network-load[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(8): 177-187.
- [16] GAN Wei, SHAHIDEPOUR M, YAN Mingyu, et al. Coordinated planning of transportation and electric power networks with the proliferation of electric vehicles[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(5): 4005-4016.
- [17] LI Ke, SHAO Chengcheng, HU Zechun, et al. An MILP method for optimal planning of electric vehicle charging stations in coordinated urban power and transportation networks[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2023, 38(6): 5406-5419.
- [18] 蔡海青, 代伟, 赵静怡, 等. 基于多参数规划的电动汽车充电站有效容量评估方法[J]. *中国电力*, 2022, 55(11): 175-183.
CAI Haiqing, DAI Wei, ZHAO Jingyi, et al. Available capacity evaluation method of electric vehicle charging stations based on multi-parametric programming[J]. *Electric Power*, 2022, 55(11): 175-183.
- [19] GAN Wei, SHAHIDEPOUR M, GUO Jianbo, et al. A tri-level planning approach to resilient expansion and hardening of coupled power distribution and transportation systems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2022, 37(2): 1495-1507.
- [20] TAO Yuechuan, QIU Jing, LAI Shuying, et al. Collaborative planning for electricity distribution network and transportation system considering hydrogen fuel cell vehicles[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2020, 6(3): 1211-1225.
- [21] 马丽, 薛飞, 石季英, 等. 有源配电网分布式电源与智能软开关三层协调规划模型[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(11): 86-93.
MA Li, XUE Fei, SHI Jiying, et al. Tri-level coordinated planning model of distributed generator and intelligent soft open point for active distribution network[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(11): 86-93.
- [22] 黄志强, 陈业伟, 毛志鹏, 等. 柔性多状态开关与分布式储能系统联合接入规划[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(14): 29-37.
HUANG Zhiqiang, CHEN Yewei, MAO Zhieng, et al.

- Joint access planning of soft open point and distributed energy storage system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(14): 29-37.
- [23] 张沈习, 王浩宇, 李然, 等. 考虑柔性多状态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.
- [24] 李正天, 叶雨晴, 王子璇, 等. 基于柔性多状态开关互联的微配网一体化规划及运行评估[J]. *电工技术学报*, 2021, 36(增刊 2): 487-495, 516.
LI Zhengtian, YE Yuqing, WANG Zixuan, et al. Integrated planning and operation evaluation of micro-distribution network based on flexible multi-state switch interconnection[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(S2): 487-495, 516.
- [25] 赵金利, 陈昊, 宋关羽, 等. 考虑可靠性收益的配电网智能软开关规划方法[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(10): 22-31.
ZHAO Jinli, CHEN Hao, SONG Guanyu, et al. Planning method of soft open point in distribution network considering reliability benefits[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(10): 22-31.
- [26] LU Hui, SHAO Changzheng, HU Bo, et al. En-route electric vehicles charging navigation considering the traffic-flow-dependent energy consumption[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2022, 18(11): 8160-8171.
- [27] JIANG Nan, XIE Chi, DUTHIE J, et al. A network equilibrium analysis on destination, route and parking choices with mixed gasoline and electric vehicular flows[J]. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 2014, (3): 55-92.
- [28] 唐俊熙, 王梓耀, 张俊潇, 等. 基于文化蚁群算法的高可靠多电源配电网规划模型[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(7): 99-107.
TANG Junxi, WANG Ziyao, ZHANG Junxiao, et al. High reliability multi-power distribution network planning model based on memetic ant colony algorithm[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(7): 99-107.
- [29] 李东东, 张凯, 姚寅, 等. 基于信息间隙决策理论的电动汽车聚合商日前需求响应调度策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(24): 101-111.
LI Dongdong, ZHANG Kai, YAO Yin, et al. Day-ahead demand response scheduling strategy of an electric vehicle aggregator based on information gap decision theory[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(24): 101-111.
- [30] 侯慧, 唐俊一, 王逸凡, 等. 城区电动汽车充电站布局规划研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(14): 181-187.
HOU Hui, TANG Junyi, WANG Yifan, et al. Layout planning of electric vehicle charging stations in urban areas[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(14): 181-187.
- [31] 郭昆健, 高赐威, 林国营, 等. 现货市场环境下售电商激励型需求响应优化策略[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(15): 28-35.
GUO Kunjian, GAO Ciwei, LIN Guoying, et al. Optimization strategy of incentive based demand response for electricity retailer in spot market environment[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(15): 28-35.
- [32] 齐先军, 程桥, 吴红斌, 等. 激励型需求响应对配电网运行可靠性的影响[J]. *电工技术学报*, 2018, 33(22): 5319-5326.
QI Xianjun, CHENG Qiao, WU Hongbin, et al. Impact of incentive-based demand response on operational reliability of distribution network[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(22): 5319-5326.
- [33] OSM. Open street map of sioux falls[EB/OL]. [2019-01-24]. <https://www.openstreetmap.org/relation/194968>.
- [34] DEBAPRIYA D. Optimal placement of capacitors in radial distribution system using a Fuzzy-GA method[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2008, 30(6-7): 361-367.
- [35] 白凯峰, 顾洁, 彭虹桥, 等. 融合风光出力场景生成的多能互补微网系统优化配置[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(15): 133-141.
BAI Kaifeng, GU Jie, PENG Hongqiao, et al. Optimal allocation for multi-energy complementary microgrid based on scenario generation of wind power and photovoltaic output[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(15): 133-141.

收稿日期: 2023-05-14; 修回日期: 2023-07-31

作者简介:

卢慧(1993—), 女, 博士研究生, 研究方向为电动汽车调度、配电网规划与运行; E-mail: luhui@cqu.edu.cn

谢开贵(1972—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力系统可靠性; E-mail: kaiguixie@vip.163.com

胡博(1983—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统优化规划。E-mail: hboy8361@163.com

(编辑 姜新丽)