

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211439

# 考虑电动汽车时空负荷分布特性的主动配电网动态重构

程杉<sup>1</sup>, 钟仕凌<sup>1</sup>, 尚冬冬<sup>1</sup>, 魏康林<sup>2</sup>, 王灿<sup>1</sup>

(1. 电力系统智能运行与安全防御宜昌市重点实验室(三峡大学), 湖北 宜昌 443002;

2. 智能终端四川省重点实验室(宜宾学院智能制造学院), 四川 宜宾 644000)

**摘要:** 实现电动汽车(Electric Vehicle, EV)规模化发展并与电网双赢的关键问题之一是如何提高EV充电负荷的预测准确性, 并保证含大规模EV充电负荷的配电网运行的安全性和经济性。考虑EV时空负荷分布特性, 建立了主动配电网动态重构与有功、无功联合优化数学模型, 并给出了其求解方法。首先, 根据出行链技术和马尔可夫决策理论, 考虑天、人、路对EV的影响因素, 构建了EV单位能耗模型和充电负荷的时空分布预测模型。其次, 提出考虑储能系统、有载分接开关、投切电容器组、静止无功补偿装置和动态重构多种主动管理措施, 计及经济、技术指标和各设备、系统运行约束, 建立了含EV的主动配电网动态重构与有功-无功联合优化数学模型。然后, 为了提高所构建模型的求解效率, 通过二阶锥松弛和变量乘积线性化方法将非凸等式约束和非线性不等式约束线性化后, 将原始的混合整数非线性规划问题转化为易求解计算的混合整数二阶锥问题。最后, 基于修改的IEEE33节点系统进行仿真实验和对比分析, 结果验证了所提方法的有效性和优越性。

**关键词:** 电动汽车; 时空分布; 主动配电网; 二阶锥松弛; 动态重构

## Dynamic reconfiguration of an active distribution network considering temporal and spatial load distribution characteristics of electric vehicles

CHENG Shan<sup>1</sup>, ZHONG Shiling<sup>1</sup>, SHANG Dongdong<sup>1</sup>, WEI Kanglin<sup>2</sup>, WANG Can<sup>1</sup>

(1. Yichang Key Laboratory of Intelligent Operation and Security Defense of Power System (China Three Gorges University), Yichang 443002, China; 2. China Intelligent Terminal Key Laboratory of Sichuan Province (Yibin University), Yibin 644000, China)

**Abstract:** To improve the accurate prediction of electric vehicle (EV) charging load and ensure the stability and economy of the distribution network penetrated with a large scale of EV is one of the key issues in realizing a win-win situation for the EV and distribution network. In this paper, a combined optimization model of active and reactive power for active distribution network reconstruction and its solution method are established considering the characteristics of EV temporal and spatial load distribution. First, from travel chain technology and Markov decision theory, and considering the influence of weather, the EV owner and traffic, an EV unit energy consumption model and the spatial-temporal load model of charging load are constructed. Secondly, considering all of the energy storage system, on-load tap changer, capacitor banks, static var compensation, dynamic reconfiguration of various active management measures, economic indicators and operation constraints, a dynamic reconfiguration and active reactive-power optimization model of an EV active distribution network are established. Then, to improve solution efficiency, the original model is transformed into a mixed integer second order cone model using second-order cone relaxation and variable product linearization methods. Finally, an improved IEEE33 system is used for simulation analysis to verify the effectiveness and superiority of the proposed method.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52107108).

**Key words:** electric vehicle; spatial-temporal distribution; active distribution network; second-order cone relaxation; dynamic restructuring

## 0 引言

全球尤其中国的EV产业正进入加速发展的新

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(52107108); 电力系统智能运行与安全防御宜昌市重点实验研究项目资助(2020DLXY01); 智能终端四川省重点实验室开放基金项目资助(SCITLAB-1009)

阶段<sup>[1-5]</sup>。虽然《新能源汽车产业发展规划》明确要求城市各区域多配置充电设施, 但是EV具有道路网络负荷和电力网络负荷的双重属性, 其驾驶行为和充电行为会受到路网和电网的交替影响<sup>[6]</sup>。因此, 实现EV规模化发展并与电网双赢的关键问题之一是如何综合考虑车-路-网的耦合性来提高EV充电负荷预测的准确性<sup>[7-8]</sup>并保证含大规模EV充电负荷的配电网运行的安全性和经济性<sup>[1,9]</sup>。

主动配电网(Active Distribution Network, ADN)技术是解决分布式新能源(Distributed Generation, DG)并网运行控制、电网与 EV 及其充放电设施互动、智能配用电问题的有效解决方案<sup>[10]</sup>。ADN 通过组合控制 DG、储能、可控负荷等资源从而提高配电网对可再生能源的接纳能力,提升能源利用效率并实现更高级别的自动化。目前,国内外学者针对含 DG 和 EV 的 ADN 网络重构开展了广泛的研究,但鲜有研究考虑 EV 负荷的时空分布特性和 EV 与交通系统、配电网的耦合性。

一方面, EV 负荷的时空特性对电网运行的影响主要是由 EV 出行行为导致充电位置的空间变化性和充电时间的不确定性所引起的。文献[11]计及交通网络拓扑特性,基于蒙特卡罗方法预测了 EV 充电负荷的时空分布,并分析了负荷时空分布特性对配电网潮流的影响;而文献[12]在综合考虑 EV 与智能电网和智能交通网络间的交互基础上,提出了大规模 EV 充电的优化调度策略。然而 EV 时空转移具有随机性,而且交通与天气状况对 EV 能耗有着显著影响。为此,文献[7]在实时动态随机模拟 EV 出行路径的基础上,建立了计及实时交通与温度的 EV 实时单位里程耗电模型;文献[13]则在 EV 入网时空模型和里程能耗模型基础上,提出了 EV 充储电站的分散式优化模型。尽管文献[7, 13-14]计及 EV 出行路径的随机性和能耗影响的多因素性,但没有考虑 EV 车主充电的主观意愿性,实际上, EV 车主的充电需求具有概率性而且其概率密度函数会随着 EV 出行起止点而变化<sup>[15]</sup>。因此,为了实现 EV 充电负荷时空分布的有效预测,需要建立计及 EV 出行路径随机性、路网及天气影响耦合性和车主充电主观性的负荷预测模型。

另一方面, EV 负荷的时空分布特性也给电力系统的运行带来了挑战<sup>[16]</sup>,而动态网络重构(Dynamic Network Reconfiguration, DNR)和主动管理措施是实现 ADN 优化调度的重要方式,两者结合能有效地改善配电网电压分布和提升配电网经济运行水平<sup>[17]</sup>。文献[18]构建了 ADN 的动态最优潮流模型,并在 ADN 各参与元素关键约束线性化出力的基础上,提出了 ADN 非线性最优潮流问题的二阶锥规划快速求解方法;文献[19]考虑可再生能源出力的时序性与随机性,提出了含高渗透率可再生能源的 ADN 日前、日内两阶段柔性软开关与联络开关的协调优化控制方法;而文献[20]则考虑 DG、EV 和其他负荷的不确定性,建立了计及运行经济性和系统电能质量的 ADN 重构双层优化数学模型

并采用改进和声搜索算法对 ADN 进行分时段动态网络重构。不同于上述研究<sup>[19-20]</sup>仅集中于 ADN 的网络重构,文献[21-22]则综合考虑包括 DNR、有载分接开关(On Load Tap Changer, OLTC)、投切电容器(Capacitor Banks, CB)、静止无功补偿装置(Static Var Compensation, SVC)无功调节等主动管理元素,建立了 ADN 最优潮流二阶锥模型。上述研究表明二阶锥形式的潮流模型可准确、高效地计算电网最优潮流分布。

综上,首先本文计及车、路、网的耦合性,提出了考虑 EV 时空转移随机性的 EV 充电负荷预测方法,即基于出行链、蒙特卡罗抽样和马尔可夫决策理论,综合考虑温度、交通状况和 EV 车主主观意愿,建立 EV 时空转移模型并应用于工作日、双休日、高温日和拥堵日等不同场景的充电负荷预测;其次,针对含 EV 的 ADN,考虑 EV 的时空分布, DG 和储能(Energy Storage System, ESS)调控, OLTC、SVC 和 CB 调节等主动管理元素,以配电网综合运行成本和电压偏差加权最小为目标函数,构建 ADN 动态重构与无功、有功联合优化数学模型;然后,为提高数学模型的求解效率,利用二阶锥松弛对非凸的潮流约束进行凸化处理,引入支路虚拟端电压变量对非凸的变量乘积项进行变量分离线性化,从而将联合优化数学模型转化为一个混合整数二阶锥规划(Mixed Integer Second-Order Cone Programming, MISOCP)问题;最后,基于修改的 IEEE33 节点系统算例进行一系列仿真,验证了所建模型和求解方法有效性和优越性。

## 1 EV 时空分布及其能耗模型

虽然 EV 发展迅速,但市场占有率还较低,难以通过样本数据分析其时空分布特性。本文通过概率密度函数模拟 EV 出行模型,并结合路网拓扑结构、EV 车主充电意愿和马尔可夫决策理论计算 EV 并网负荷的时空分布。

### 1.1 EV 出行链及其数学表达

如图 1 所示,根据人们日常活动将出行需求分为回家(Home, H)、工作(Work, W)、上学(School, S)、购物聚餐(Shopping & Eating, SE)、休闲娱乐(Recreation & Entertainment, RE)和其他(Other Things, OT) 6 种,包括单目的出行链 H-W、H-S/SE/RE/OT 和多目的出行链 H-W-S/SE/RE/OT。假设出行链途经的地点都可以对 EV 进行充电。

EV 出行时间  $t_s$  服从正态概率分布,其概率密度函数  $f(t_s)$  如式(1)所示。

$$f(t_s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(t_s - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

式中,  $\mu$  和  $\sigma$  随着出行链变化。

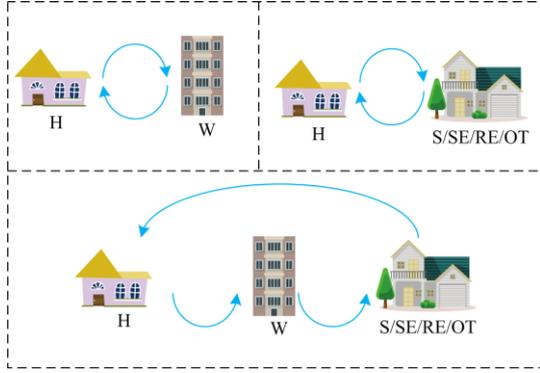


图 1 出行链结构

Fig. 1 Trip chain structure

## 1.2 EV 出行路径随机性及其模拟

基于马尔可夫决策理论的 EV 出行路径如图 2 所示, 过程由  $\{T, S, A, p, R\}$  5 种参数构成。

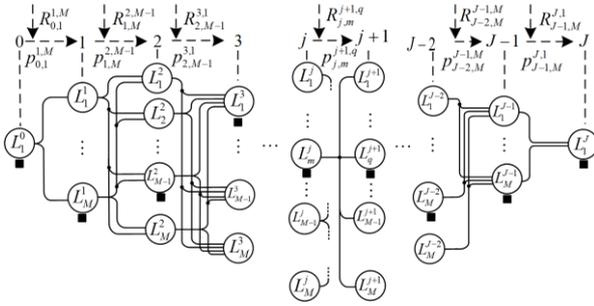


图 2 交通网络示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the transportation network

1)  $T$  为出行链中的决策时间集, 设行程有  $J$  个地点,  $t_{j|j \in \{0,1,2,L,J-1\}}$  是经过地点  $j$  的时刻。

2)  $S$  为出行链的状态空间集, 设交通网络中有  $L$  个地点,  $s_j$  是  $t_j$  时刻 EV 位置,  $s_j \in \{0,1,2,L,L\}$ 。

3)  $A$  规定了出行链中的动作集, 为每个决策时刻的可选动作。策略  $\pi$  指的是在  $t_0$  到  $t_{j-1}$  的一组有序决策, 可表示为:  $\pi = \{\pi_s(j) | j=0,1,2,L,J-1, \pi_s(j) \in S\}$ 。也就是说策略  $\pi$  可以直接表示出行链中的具体路径, 如图 2 所示, 黑色方块表示 EV 出行经过的地点, 则该 EV 做出的策略为:  $\{L_1^0, L_M^1, L_{M-1}^2, L_1^3, L_M^j, L_M^{j+1}, L_M^{j-2}, L_M^{j-1}, L_1^j\}$ ,  $M$  为 EV 在地点  $j$  时可选择地点的总数。

4)  $p$  表示出行链中的转移概率矩阵集合。当 EV 在  $t_j$  时刻做出路径选择行动后, 会从当前状态  $s_j$  转

移到下一状态  $s_{j+1}$ 。两状态间的概率表示为

$$p_{j,j+1}^a = p(S = s_{j+1} | S = s_j, I, \pi(s_j) = a) \quad (2)$$

在 EV 随机路径模拟中, 若  $s_j = L_M^j$ , 可得到状态转移概率, 设  $D_{j,m}^{j+1,q}$ 、 $v_{j,m}^{j+1,q}$  分别表示  $L_M^j$  和  $L_q^{j+1} |_{q \in \{0,1,2,L,M\}}$  之间的距离和行驶速度。若 EV 在状态  $s_j$  进行路径选择时, 能以最短时间到达下一地点  $L_{st}^{j+1}$ , 则  $p_{j,m}^{j+1,st} |_{st \in \{1,2,L,M\}}$  大于相同状态下的其他转移概率, 然后根据 EV 从  $L_M^j$  行驶至  $L_q^{j+1}$  的时间确定选择概率  $p_{j,m}^{j+1,q}$ , 可表示为

$$\begin{cases} p_{-t}^{j+1,q} = 1 & M = 1 \\ p_{-t}^{j+1,q} = \frac{\sum_{k=1}^n \frac{D_{j,m}^{j+1,k}}{v_{j,m}^{j+1,k}} - \frac{D_{j,m}^{j+1,q}}{v_{j,m}^{j+1,q}}}{(M-1) \sum_{k=1}^M \frac{D_{j,m}^{j+1,k}}{v_{j,m}^{j+1,k}}} & M \geq 2 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} p_{j,m}^{j+1,q} = 1 & M = 1 \\ p_{j,m}^{j+1,q} = \frac{(1 - p_{j,m}^{j+1,st}) D_{j,m}^{j+1,q}}{(1 - p_{-t_{\max}}) v_{j,m}^{j+1,q}} & M \geq 2, q \neq st \end{cases} \quad (4)$$

通过式(3)、式(4)可以保证在车主选择路径时, 行驶时间越长, 被选中的概率越小。

5)  $R$  表示出行链中的回报率, 用于评估 EV 在某一决策时刻处于某一状态做出行动的优劣。本文中  $R$  是指 EV 随机路径模拟的行驶时间, 即行驶时间越短, 报酬越大。

## 1.3 EV 的单位里程能耗模型和充电模型

### 1.3.1 单位里程能耗模型

设  $v_t^{i,j}(x)$  为道路  $(i,j)$  上  $x$  处 EV 的速度,  $i$  和  $j$  分别为道路的两侧, 基于速度-流量模型<sup>[23]</sup>, 可得

$$\begin{cases} v_t^{i,j}(x) = \frac{v_{\max}^{i,j}}{1 + \chi_t^\beta} \\ \beta = a_1 + a_2 \cdot \chi_t^{a_3} \\ \chi_t = \frac{d_t^{i,j}(x)}{Tr^{i,j}} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $d_t^{i,j}(x)$  表示道路  $(i,j)$  的车流量;  $Tr^{i,j}$  表示交通运输能力;  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  为道路自适应系数;  $\chi_t$  为  $t$  时刻道路饱和度(不同时刻的取值见文献[24])。

计及空调开启的 EV 每公里耗电量计算如式(6)。

$$E_t^{i,j}(x) = -0.179 + 0.004v_t^{i,j}(x) + \frac{5.492}{v_t^{i,j}(x)} \quad (6)$$

式中,  $E_t^{i,j}(x)$  为未计空调开启的 EV 每公里耗电量。

实际温度的变化能影响 EV 用户空调开启率<sup>[13]</sup>, 具体可表示为

$$\begin{cases} K_{\text{pect}} = k_1 b^3 + k_2 b^2 + k_3 b + c_1 \\ K_{\text{temp}} = k_4 (b + c_2)^2 + c_3 \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $K_{\text{temp}}$  为能量比例系数;  $K_{\text{pect}}$  为不同温度下的空调开启率, 假设生成某一温度均匀分布的随机数  $d$ , 如果  $d < K_{\text{pect}}$ , 则开启空调;  $k_1 - k_4$  和  $c_1 - c_3$  为拟合参数;  $b$  代表温度。

综合式(6)和式(7), EV 的实际每公里耗电量可表示为

$$E_t(x) = \begin{cases} K_t^{\text{temp}}(t) E_t^{i,j}(x) & \text{空调开启} \\ E_t^{i,j}(x) & \text{空调关闭} \end{cases} \quad (8)$$

因此, EV 在地点  $x$  的荷电状态计算式为

$$x_{\text{SOC}} = \left( I_{\text{SOC}} - \frac{\sum_0^{D^x} E_t(x)}{C_{\text{EV}}} \right) \times 100\% \quad (9)$$

式中:  $I_{\text{SOC}}$  为初始荷电状态;  $D^x$  为行程起点到  $x$  的距离;  $C_{\text{EV}}$  为电池容量。

### 1.3.2 考虑车主主观意愿的 EV 充电模型

将 EV 的充电需求分为荷电状态不足时充电和行程结束后因里程焦虑的主观意愿充电两类: 1) EV 的荷电状态可行驶距离不足以到达下一个目的地或者充电站时, 则用户会选择在当前地点充电。2) EV 不足以满足下一段行程, 用户会出于主观意愿给 EV 充电。剩余电量和下一段行驶距离  $D_{\text{next}}$  之比越小, 充电的意愿越强。采用模糊理论, 根据用户主观意愿  $uu_{\text{sat}}$  来描述 EV 用户的主观充电意愿:

$$uu_{\text{sat}} = \frac{x_{\text{SOC}} C_{\text{EV}}}{\sum_0^{D_{\text{next}}} E_t(x)} \quad (10)$$

引入  $F_{\text{fuz}}$  表示充电意愿的模糊集, 其隶属函数  $F_{\text{fuz}}(uu_{\text{sat}})$  可由式(11)表示<sup>[15]</sup>。

$$\begin{cases} F_{\text{fuz}}(uu_{\text{sat}}) = \begin{cases} 1, & uu_{\text{sat}} < uu_{\text{sat}}^{\min} \\ \tau, & uu_{\text{sat}}^{\min} < uu_{\text{sat}} < uu_{\text{sat}}^{\max} \\ 0, & uu_{\text{sat}} \geq uu_{\text{sat}}^{\max} \end{cases} \\ \tau = \sin \left\{ \frac{\pi}{4} \left( 1 + \frac{uu_{\text{sat}}^{\min}}{2} \left( \frac{uu_{\text{sat}}^{\max} - 2uu_{\text{sat}} + uu_{\text{sat}}^{\min}}{uu_{\text{sat}}^{\max} - uu_{\text{sat}}^{\min}} \right) \right) \right\} \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $uu_{\text{sat}}^{\max}$ 、 $uu_{\text{sat}}^{\min}$  分别为  $uu_{\text{sat}}$  的上、下限。

EV 有两种充电模式, 考虑到充电成本和和电

损耗, 默认为慢充, 若停驻结束慢充无法满足期望荷电状态  $E_{\text{SOC}}$ , 即满足式(12)时选择快充。

$$\frac{P_{\text{slow}} T_{\text{Park}}^i}{C_{\text{EV}}} + I_{\text{SOC}}^i < E_{\text{SOC}} \quad (12)$$

式中:  $P_{\text{slow}}$  为 EV 额定慢充功率;  $T_{\text{Park}}^i$ 、 $I_{\text{SOC}}^i$  分别为 EV 在停车点  $i$  的停车时长、初始荷电状态。

若 EV 在行驶过程中的荷电状态低于  $M_{\text{SOC}}$ , 则会在中途进行充电, 充电地点  $L_{\text{par}}^{\text{mid}}$  为靠近目的地的充电站, 充电时间  $T_{\text{char}}$  的计算公式如下。

$$\begin{cases} \sum_0^{D_{\text{mar}}} E_t(x) = C_{\text{EV}} \times (I_{\text{SOC}} - M_{\text{SOC}}) \\ L_{\text{par}}^{\text{mid}} = f(r_c) \\ \sum_{r=1}^{r_c} D_r < D_{\text{mar}}, r_c \in \{1, 2, L, J\} \\ D_{\text{mid}} = \sum_{r=1}^{r_c} D_r \\ T_{\text{char}} = \frac{\sum_0^{D_{\text{mid}}} E_t(x) - I_{\text{SOC}} C_{\text{EV}}}{(P_{\text{fast}} \parallel P_{\text{slow}})} \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} D_{\text{mid}} = \sum_{r=1}^{r_c} D_r \\ T_{\text{char}} = \frac{\sum_0^{D_{\text{mid}}} E_t(x) - I_{\text{SOC}} C_{\text{EV}}}{(P_{\text{fast}} \parallel P_{\text{slow}})} \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $D_{\text{thr}}$  为 EV 从  $I_{\text{SOC}}$  到临界荷电状态  $M_{\text{SOC}}$  的可行驶距离;  $\sum D_r$  表示 EV 行程起点与第  $r$  个充电站之间的距离;  $r_c$  表示 EV 的荷电状态降至  $M_{\text{SOC}}$  时, 经过的充电站数量;  $f(r_c)$  表示  $r_c$  对应的交通网络;  $P_{\text{fast}}$  和  $P_{\text{slow}}$  为额定快充功率和慢充功率。

### 1.4 EV 充电负荷

根据交通节点和配电网络的耦合关系, 统计各配电节点的时空负荷, 配电节点  $i$  处的充电负荷  $P_i(t)$  和配电网总充电负荷  $P_{\text{DN}}(t)$  可分别表示为

$$P_i(t) = \sum_{n=1}^{N_{\text{EV}}} P_i^n(t) \quad (15)$$

$$P_{\text{DN}}(t) = \sum_{i=1}^{N_w} P_i(t) \quad (16)$$

式中,  $N_{\text{EV}}$  和  $N_w$  分别为  $t$  时刻充电节点 EV 和充电节点的数量, 将  $P_{\text{DN}}(t)$  储存于  $N_w \times 24$  的矩阵  $\mathbf{W}$  中, 当迭代次数  $y_1$  达到最大值  $z_1$  或满足式(17)时, 输出结果, 否则继续进行充电负荷预测。

$$\max \left\{ \left| A_n^{\mathbf{W}_b} - A_{n-1}^{\mathbf{W}_b} \right| \right\} \leq \zeta_1 \quad (17)$$

式中:  $\mathbf{W}_b$  表示  $\mathbf{W}$  中的第  $b$  列向量;  $A_n^{\mathbf{W}_b}$  表示第  $n$  次模拟的  $\mathbf{W}_b$  中的平均值;  $\zeta_1$  为收敛精度。

综上, EV 充电负荷计算流程图如图 3 所示。

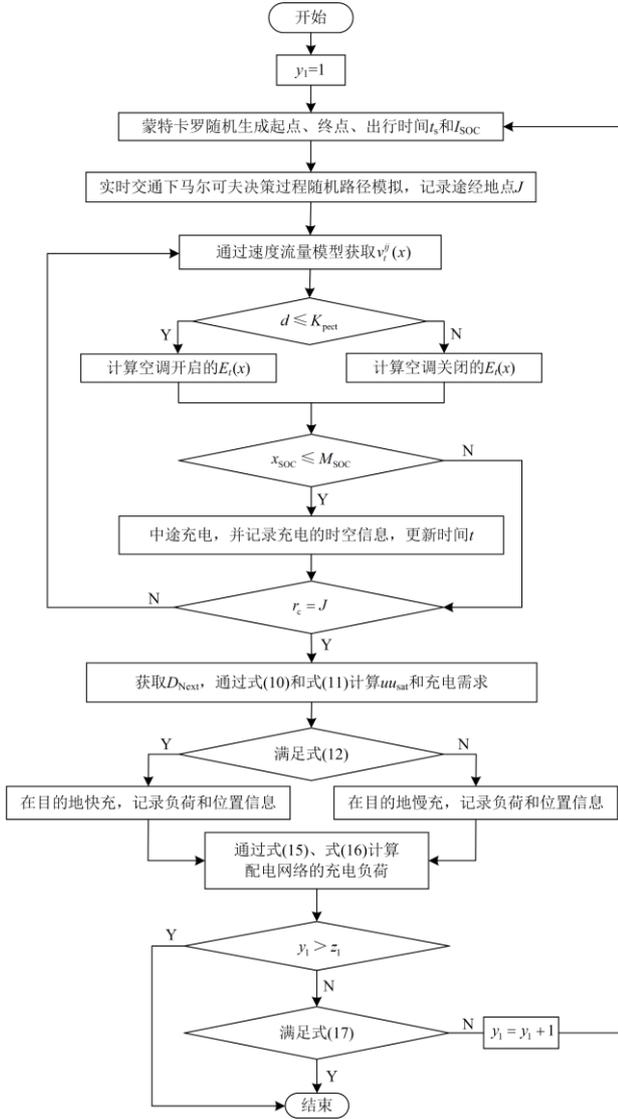


图 3 EV 时空充电负荷计算流程图

Fig. 3 Flow chart of EV temporal and spatial charging load calculation

## 2 考虑动态重构的配电网优化运行模型

EV 的时空不确定性使其负荷具有随机性, 易引起配电网过负荷, 增加系统损耗, 造成电压畸形甚至失稳。本文计及综合运行成本与电压偏差等指标、主动管理技术和各设备与系统运行约束, 建立 ADN 动态重构与无功、有功联合优化数学模型。

### 2.1 目标函数

目标函数由综合运行成本和电压偏差指标加权组成, 如式(18)。

$$\min \{ \mu_1 (f_L + f_{DG} + f_0) + \mu_2 C_V f_V \} \quad (18)$$

式中:  $f_L$ 、 $f_{DG}$  和  $f_0$  分别为有功网损、弃风弃光和

开关动作的费用;  $f_V$  为电压偏差;  $\mu_1$  和  $\mu_2$  为权重系数, 且  $\mu_1 + \mu_2 = 1$ 。

$$f_L = C_L \sum_{t=1}^T \sum_{ij \in \Omega^E} I_{ij,t}^2 r_{ij} \Delta t \quad (19)$$

$$f_{DG} = C_D \sum_{t=1}^T \sum_{i \in \Omega^{DG}} (P^{DG} - P_{i,t}^{DG}) \Delta t \quad (20)$$

$$f_0 = C_0 \sum_{ij \in \Omega^E} |\Delta Z_{ij} - \Delta Z_{ij}^0| \quad (21)$$

$$f_V = C_V \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N |V_{i,t}^2 - V_{th}^2| \quad (22)$$

式中:  $T$  为总调度时间 24 h;  $i$  为配电网节点的数量;  $\Omega^E$  和  $\Omega^{DG}$  分别为电网支路集合和 DG 所在节点集合;  $C_L$ 、 $C_D$ 、 $C_0$  和  $C_V$  为不同成本系数;  $V_{th}$  为理想运行电压的阈值。

### 2.2 约束条件

#### 1) 功率平衡约束

$$P_{G,i,t} - P_{L,i,t} = \sum_{j \in N(i)} \Delta Z_{ij} P_{ij,t} \quad (23)$$

$$Q_{G,i,t} - Q_{L,i,t} = \sum_{j \in N(i)} \Delta Z_{ij} Q_{ij,t} \quad (24)$$

$$P_{ij,t} = g_{ij} V_{i,t}^2 - g_{ij} V_{i,t} V_{j,t} \cos \theta_{ij,t} - b_{ij} V_{i,t} V_{j,t} \sin \theta_{ij,t} \quad (25)$$

$$Q_{ij,t} = -b_{ij} V_{i,t}^2 + b_{ij} V_{i,t} V_{j,t} \cos \theta_{ij,t} - g_{ij} V_{i,t} V_{j,t} \sin \theta_{ij,t} \quad (26)$$

式中:  $\Delta Z_{ij}$  为 0、1 变量, 分别表示支路  $ij$  处于开、闭状态;  $P_{G,i,t}$ 、 $Q_{G,i,t}$  分别为  $t$  时刻注入节点  $i$  的有功、无功功率;  $P_{ij,t}$ 、 $Q_{ij,t}$  分别为  $t$  时刻流过支路  $ij$  的有功、无功功率, 均以从节点  $i$  流出为正;  $g_{ij}$  和  $b_{ij}$  分别为支路  $ij$  的电导和电纳;  $V_{i,t}$ 、 $V_{j,t}$  和  $\theta_{ij,t}$  分别为  $t$  时刻  $i$ 、 $j$  的电压幅值和  $i$ 、 $j$  之间的电压相位差。

#### 2) 支路载流量约束

$$\lambda_{ij} (g_{ij}^2 + b_{ij}^2) (V_{i,t}^2 + V_{j,t}^2 - 2V_{i,t} V_{j,t} \cos \theta_{ij,t}) \leq I_{ij,max}^2 \quad (27)$$

式中,  $I_{ij,max}$  为电流幅值的最大值。

#### 3) 节点电压约束

$$V_{i,min} \leq V_{i,t} \leq V_{i,max} \quad (28)$$

式中,  $V_{i,max}$ 、 $V_{i,min}$  为节点  $i$  电压上、下限。

#### 4) 辐射型网络约束

配电网一般都是闭环设计、开环运行, 利用最小生成树算法确保重构过程中配电网的辐射结构, 即满足式(29), 其中, 涉及到求解配电网对偶图的方法如附录 A 所示。

$$\begin{cases} E_{ij} + E_{ji} = \Delta Z_{ij} \\ \sum_{j \in N(i)} E_{ij} = 1, i = 1, L, n-1 \\ E_{ij} = 0, j \in N(0) \\ \sum_{m \in M_k} \sum_{e \in S_k} Y_{mk,e} = 1 \\ E_{ij} + E_{ji} + Y_{mk,e} + Y_{km,e} = 1 \end{cases} \quad (29)$$

式中:  $E_{ij}$ 、 $E_{ji}$  均为 0、1 变量,  $E_{ij} = 1$  表示支路潮流方向为节点  $j$  流向节点  $i$ , 且节点  $j$  为节点  $i$  的父节点;  $N(i)$  表示与节点  $i$  相连的节点集合;  $Y_{mk,e}$ 、 $Y_{km,e}$  亦为 0、1 变量。

5) OLTC 运行约束<sup>[18]</sup>

$$\begin{cases} V_{j,\min}^2 \leq (V_{j,t}^{\text{Base}})^2 O_{j,t} \leq V_{j,\max}^2 \\ O_j^{\min} \leq O_{j,t} \leq O_j^{\max}, \forall t, \forall j \in \Omega^{\text{Sub}} \\ O_{j,t} = O_j^{\min} + \sum_s O_{j,s} \sigma_{j,s,t}^{\text{OLTC}} \end{cases} \quad (30)$$

式中:  $\Omega^{\text{Sub}}$  为变电站节点;  $V_{j,t}^{\text{Base}}$  为变压器高压侧电压值;  $O_{j,t}$  为 OLTC 变比平方,  $O_j^{\max}$  和  $O_j^{\min}$  为其上、下限;  $O_{j,s}$  为 OLTC 挡位  $s$  与挡位  $s-1$  的变比平方差值;  $\sigma_{j,s,t}^{\text{OLTC}}$  为 0、1 变量, 调节次数约束如式(31)所示。

$$\begin{cases} \sigma_{j,1,t}^{\text{OLTC}} \geq \sigma_{j,2,t}^{\text{OLTC}} \geq \sigma_{j,SR_j,t}^{\text{OLTC}} \\ \delta_{j,t}^{\text{OLTC,IN}} + \delta_{j,t}^{\text{OLTC,DE}} \leq 1 \\ \sum_s \sigma_{j,s,t}^{\text{OLTC}} - \sum_s \sigma_{j,s,t-1}^{\text{OLTC}} \geq \delta_{j,t}^{\text{OLTC,IN}} - \delta_{j,t}^{\text{OLTC,DE}} SR_j \\ \sum_s \sigma_{j,s,t}^{\text{OLTC}} - \sum_s \sigma_{j,s,t-1}^{\text{OLTC}} \leq \delta_{j,t}^{\text{OLTC,IN}} SR_j - \delta_{j,t}^{\text{OLTC,DE}} \\ \sum_{t \in T} (\delta_{j,t}^{\text{OLTC,IN}} + \delta_{j,t}^{\text{OLTC,DE}}) \leq \lambda_j^{\text{OLTC,max}} \end{cases} \quad (31)$$

式中:  $\forall t, \forall j \in \Omega^{\text{Sub}}$ ;  $\delta_{j,t}^{\text{OLTC,IN}}$  和  $\delta_{j,t}^{\text{OLTC,DE}}$  为 OLTC 挡位调节变化标识;  $SR_j^{\text{OLTC}}$  为挡位最大变化范围;  $\lambda_j^{\text{OLTC,max}}$  为 OLTC 挡位日内可动作最大次数。

6) CB 约束

CB 为离散型无功补偿, 其约束为

$$\begin{cases} Q_{j,t}^{\text{CB}} = y_{j,t}^{\text{CB}} Q_j^{\text{CB,step}} \\ 0 \leq y_{j,t}^{\text{CB}} \leq y_{j,t}^{\text{CB,max}}, \forall t, \forall j \in \Omega^{\text{CB}} \end{cases} \quad (32)$$

式中:  $\Omega^{\text{CB}}$  为 CB 所在节点集合;  $y_{j,t}^{\text{CB}}$  表示  $t$  时段电容投运组数, 为整数变量;  $Q_j^{\text{CB,step}}$  为每组电容器的无功输出量。

7) SVC 约束

SVC 为连续无功调节装置, 其约束为

$$Q_j^{\text{SVC,min}} \leq Q_{j,t}^{\text{SVC}} \leq Q_j^{\text{SVC,max}}, \forall t, \forall j \in \Omega^{\text{SVC}} \quad (33)$$

式中:  $\Omega^{\text{SVC}}$  为 SVC 所在节点集合;  $Q_j^{\text{SVC,max}}$ 、 $Q_j^{\text{SVC,min}}$  为 SVC 功率的上、下限。

8) DG 出力约束

DG 接入的有功功率和无功功率约束为

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{DG},j,t} \leq P_{\text{DG},j,t}^f \\ Q_{\text{DG},j,t} \leq P_{\text{DG},j,t} \tan \varphi_{\text{DG},j} \leq Q_{\text{DG},j,t} \leq P_{\text{DG},j,t} \\ P_{\text{DG},j,t}^{\text{curt}} = P_{\text{DG},j,t}^f - P_{\text{DG},j,t} \end{cases} \quad (34)$$

式中:  $\forall t, \forall j \in \Omega^{\text{DG}}$ ;  $P_{\text{DG},j,t}$  和  $Q_{\text{DG},j,t}$  分别为  $t$  时刻 DG 节点处的实际有功、无功功率;  $P_{\text{DG},j,t}^f$  和  $P_{\text{DG},j,t}^{\text{curt}}$  为该时刻出力预测值和弃 DG 的量; 并且对 DG 采取限定功率因素范围运行。

9) ESS 约束

$$\begin{cases} y_{j,t}^{\text{ch}} + y_{j,t}^{\text{dis}} \leq 1 \\ \begin{cases} 0 \leq P_{j,t}^{\text{dis}} \leq y_{j,t}^{\text{dis}} P_j^{\text{max}} \\ 0 \leq P_{j,t}^{\text{ch}} \leq y_{j,t}^{\text{ch}} P_j^{\text{max}} \end{cases} \\ \begin{cases} E_{j,t+1}^{\text{ESS}} = E_{j,t}^{\text{ESS}} + \alpha P_{j,t}^{\text{ch}} - \beta P_{j,t}^{\text{dis}} \\ 0.1 E_j^{\text{max}} \leq E_{j,t}^{\text{ESS}} \leq 0.9 E_j^{\text{max}} \end{cases} \end{cases} \quad (35)$$

式中:  $\forall t, \forall j \in \Omega^{\text{ESS}}$ ;  $y_{j,t}^{\text{ch}}$  和  $y_{j,t}^{\text{dis}}$  表示充、放电状态, 为 0、1 变量;  $P_j^{\text{max}}$ 、 $E_{j,t}^{\text{ESS}}$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$  分别为 ESS 最大充电功率、 $t$  时段的电量和充、放电效率。

10) 开关动作次数约束

频繁的开关变化会给配电网的安全稳定运行和保障电能质量带来挑战, 考虑开关使用寿命、开关动作成本且防止对系统造成较大冲击, 本文综合考虑一天内风光出力和负荷变化情况, 以一天为周期产生日重构决策。

$$\sum_{ij \in \Omega^E} |\Delta Z_{ij} - \Delta Z_{ij}^0| \leq \lambda^{\text{SW,max}} \quad (36)$$

式中:  $\Delta Z_{ij}^0$  表示支路  $ij$  开关的初始状态;  $\lambda^{\text{SW,max}}$  表示最大动作次数。

## 2.3 模型转化

上述联合优化模型为混合整数非线性规划 (Mixed-Integer Nonlinear Programming, MINLP) 问题, 难以求解, 采用如下方法对模型进行转化。

1) 潮流方程的二阶锥松弛

潮流方程为非凸形式, 二阶锥松弛可保证将其松弛后解的最优性和近似精度<sup>[25]</sup>。首先对潮流方程进行变量替换, 定义:

$$\begin{cases} U_{i,t} = V_{i,t}^2 \\ W_{ij,t} = V_{i,t} V_{j,t} \cos \theta_{ij,t} \\ T_{ij,t} = V_{i,t} V_{j,t} \sin \theta_{ij,t} \end{cases} \quad (37)$$



### 3.1.1 工作日与双休日充电负荷分布

该区域各节点在工作日、双休日的充电负荷分布如图 5 所示。在工作日，工业区用电高峰时段主要集中在 09:00—12:00，居民区和商业区用电高峰时段主要集中在 18:00—22:00，其余时间各地点充电负荷几乎为 0。而双休日不上班，工业区充电负荷基本为 0，居民区和商业区的充电负荷在 09:00—24:00 呈均匀分布。这种时空分布主要是由于行程的出行链结构和出发时间决定的。工作日和双休日中各区域的负荷峰值时段相较出发起始时段均延迟 1~3 h，这个时间差为交通状况导致。此外，工作日的负荷峰值大概为双休日负荷峰值的 1.5 倍，这是因为双休日中 30% 的出行车辆数量为闲置，从而未产生额外充电负荷。

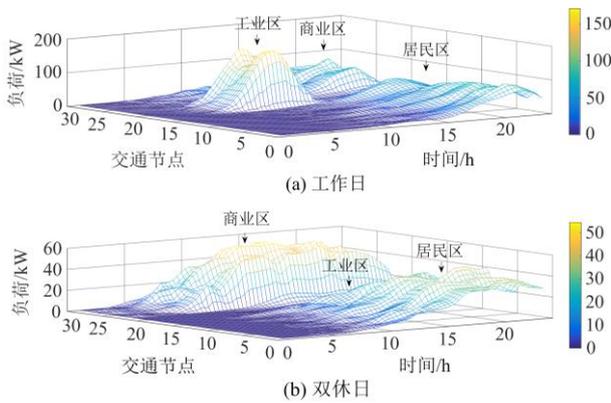


图 5 工作日和双休日的充电负荷时空分布  
Fig. 5 Charging load temporal and spatial distribution on weekday and weekend

### 3.1.2 高温日与拥堵日充电负荷分布

为了研究温度和交通状况对充电需求的影响，进行了高温日和拥堵日的充电负荷预测，结果如图 6 所示。需要说明的是，高温日和拥堵日的输入参数除温度和 EV 行驶速度外，其余与工作日相同。可以看出，高温日的时空分布与工作日基本一致，但前者负荷峰值急剧增加，增长负荷占工作日负荷的 80.1%。这是由于在高温日 EV 的电能消耗不仅用于交通，还有一部分用于空调制冷。而对于拥堵日，充电负荷幅值相较工作日负荷增长 52.3%，且负荷整体出现了时间维度上的迟滞，尤其是居民区在 20:00 以后才逐渐进入负荷高峰，这是因为 EV 的拥堵导致交通耗时增加，从而造成了接入时段整体后移。

### 3.2 优化结果分析

分析了不同场景下的充电负荷后，可发现充电负荷在时间和空间上都有较大波动。为满足 EV 时

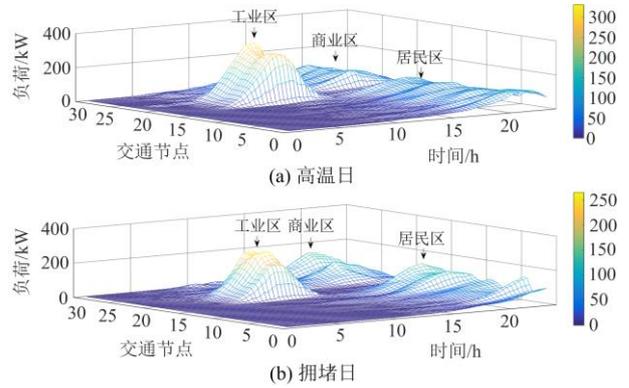


图 6 高温日和拥堵日的充电负荷时空分布  
Fig. 6 Charging load temporal and spatial distribution in high-temperature and congestive days

空负荷接入后 ADN 的安全、稳定运行，本文选取负荷波动最大的拥堵日进行对比分析。

模式 1：仅考虑 ESS 和 DG 有功功率优化。

模式 2：在模式 1 的基础上考虑电压偏差。

模式 3：在模式 2 的基础上添加 OLTC、CB、SVC 进行有功-无功功率联合优化。

模式 4：在模式 3 有功、无功功率联合优化的基础上添加动态网络重构。

由于充电负荷波动很大，当不考虑 ESS 和 DG 时，电压会低于 0.95 p.u.，电压越下限，所以没有设置对比分析。在考虑有功优化的基础上，4 种模式下的优化结果如表 1 所示，对比模式 1 和模式 2 可以看出，运行成本略微增加，但电压的越下限风险明显降低(结合图 7 分析)；对比模式 2 和模式 3 可以看出，有功-无功联合优化显著降低线损成本和主动购电费用，分别降低了 49.4%和 8.9%，同时大幅度减少 DG 的弃风、弃光现象，降低了 81.1%；对比模式 3 和模式 4 可以看出，考虑动态网络重构可以进一步降低网损和主动购电费用，分别降低了 33.8%和 4.4%，同时促进了 DG 的完全消纳，表明在 EV 时空负荷接入后动态重构和有功-无功联合优化对提高配电网经济运行方面有良好的效果。

表 1 4 种模式下的优化结果

模式编号	网损成本/元	主网购电费用/元	弃风弃光费用/元	开关动作成本/元	总成本/元
1	4998.3	23 750.1	740	—	29 488.4
2	5142.4	23 710.6	751.4	—	29 604.4
3	2600.3	21 597.4	141.8	—	24 339.5
4	1721.7	20 653.9	0	21	22 396.6

4 种模式下的网络节点电压分布如图 7 所示。从图中可发现，模式 1 和模式 2 由于接入的负荷较

大, 并且未考虑 OLTC、CB、SVC, 导致配电网无功电压补偿不足, 电压水平普遍偏低, 但模式 2 考虑了电压偏差, 电压在 0.95 p.u.附近的波动(图中的蓝色部分)明显减少; 模式 3 采用了有功无功联合优化后, 显著提高了各节点的电压水平, 但电压曲线变化较大, 这是由于充电负荷随时间变化较大导致的; 而动态重构可以改善电压波动<sup>[20]</sup>, 对比模式 2 和模式 3, 模式 4 的动态重构和有功-无功联合优化使节点电压更为平稳, 全部在 0.97~1.03 p.u.之间, 可看出通过改变网络拓扑结构能有效平抑时空负荷引起的电压波动, 提高配电网电压质量, 也说明当 EV 时空负荷接入后, 动态重构和多种主动管理措施能保证配电网的安全、经济运行。另外, 添加电压偏移阈值后, 运行成本只是略微上升, 运营商可以通过牺牲一定的经济性, 改变电压偏移的权重, 从而降低电压越限的风险。

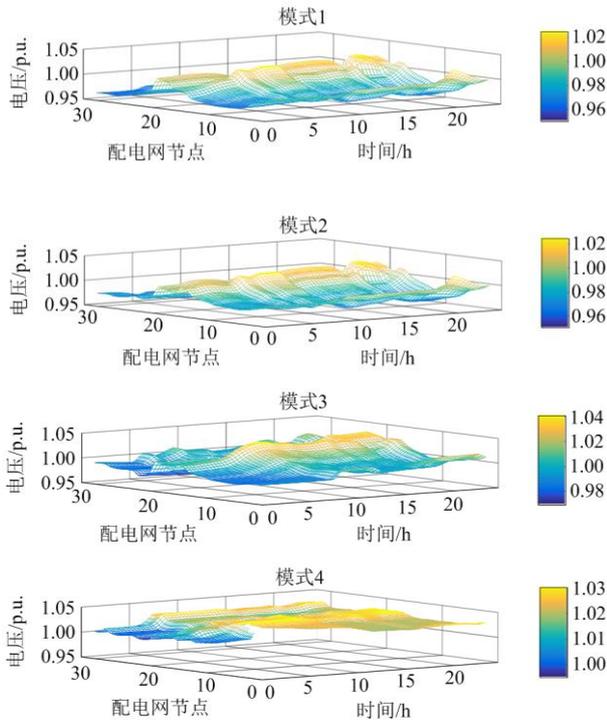
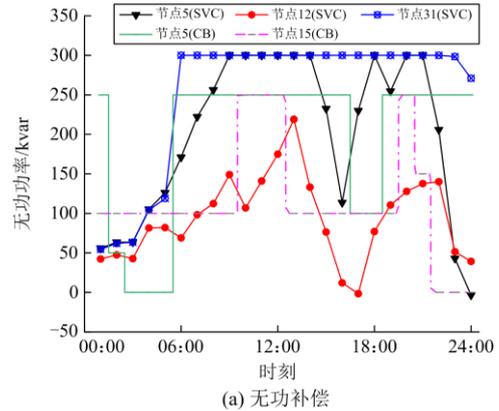


图 7 24 h 节点电压分布

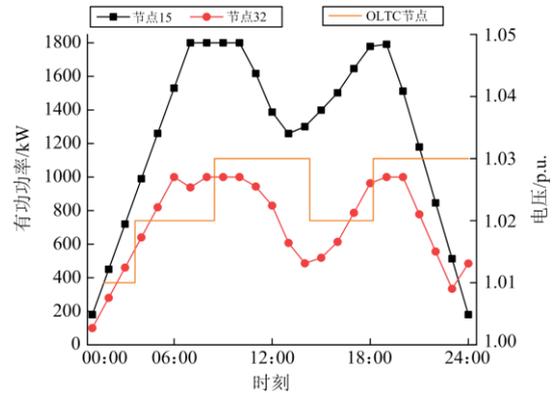
Fig. 7 Voltage distribution at 24 h node

无功补偿的出力如图 8(a)所示, 节点 5 的 CB 和 SVC 设备在 06:00 后出力逐渐升高, 并在 10:00 达到峰值, 这是由于节点 5 相连的节点 25 对应的区域为工业区, 其用电高峰主要集中在 09:00—12:00, 同时此时段系统的总负荷也最大, 所以节点 5 的补偿值在该时段达到最大, 并且其他节点的补偿值也有所提高。储能的充放电是由电价和负荷共同决定的, 如图 8(b)所示, 00:00—07:00 和 09:00—12:00 电

价分别处于最低和最高, 储能受分时电价的影响在 00:00—07:00 进行充电, 在 09:00—12:00 进行放电。节点 15 和节点 32 所属的居民区和商业区在 20:00 以后才进入负荷高峰, 为减轻高负荷对电网的冲击, 储能能在 13:00—19:00 进行充电, 在 20:00—24:00 进行放电, 可以看出储能在 EV 接入后起到了良好的削峰填谷的作用。另外, 两个节点储能的充、放电趋势大致相同, 说明电价是影响储能出力的主要原因。



(a) 无功补偿



(b) 储能和 OLTC

图 8 各设备出力

Fig. 8 Output of each equipment

### 3.3 有效性分析

#### 3.3.1 松弛误差分析

为验证文中的松弛处理, 定义二阶锥误差  $E_{ij}^t = |W_{ij,t}^2 + T_{ij,t}^2 - U_{i,t}^j U_{j,t}^j|$ 。由图 9 可知二阶锥误差均为  $10^{-8}$  数量级, 满足工程要求。图 9 中存在断点, 是因为配电网运行方式为开环, 网络中存在断开支路, 而断开支路的误差为 0。

#### 3.3.2 计算速度分析

为验证模型的优越性, 现将模型转化前后的求解速度进行对比。转换前优化模型为 MINLP, 对于大规模非线性规划问题, 现有的求解方法有智能算

法和传统的数值方法，本文将以粒子群算法和 Knitro 算法包为例进行比较，如表 2 所示。可以看出，直接求解所耗时间且难以求解，将模型转化为 MISOCP 后，求解效率显著提升。

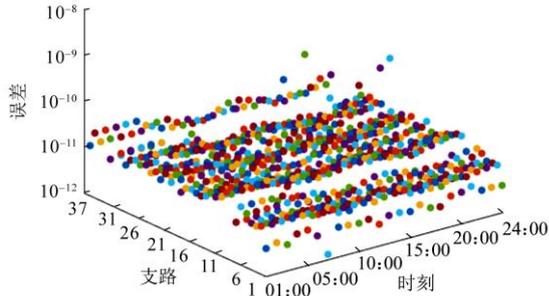


图 9 二阶锥松弛误差

Fig. 9 Second order cone relaxation error

表 2 不同方法求解速度比较

Table 2 Different methods to solve the speed

模型类型	求解算法	耗时
MISOCP	Cplex	113.3 s
MINLP	粒子群算法	>1 h
MINLP	Knitro	Infeasible

## 4 结论

本文提出了一种考虑 EV 时空分布特性的 ADN 动态重构，根据仿真结果得到以下结论：

1) 计及温度、交通状况和车主主观意愿的 EV 充电负荷时空分布预测模型考虑了天、人、路对 EV 出行路径的影响，可以真实地反映 EV 出行路径的随机性和各因素间的耦合性。

2) 计及主动管理技术和考虑经济性与技术性指标的 ADN 动态重构与有功-无功联合优化模型可显著降低网损、促进 DG 消纳和减少系统电压波动；同时可以通过改变经济性与技术性指标权重得到体现偏好的 ADN 运行方案。

3) 二阶锥松弛和变量乘积线性化有效地将联合优化模型进行凸化处理，在满足工程求解精度的同时降低了求解的复杂度，显著提高了模型的求解效率。

4) 储能削峰填谷作用明显，EV 充电站合理配置储能系统将进一步降低 EV 时空负荷随机性对电网的冲击，提高 ADN 运行的经济性和可靠性。

### 附录 A

现有配电网重构相关文献往往不涉及对偶图，根据图论提出一种求解配电网对偶图的算法。

任意一个平面上的图  $G$ ，若满足以下条件：

① 在  $G$  的每个面  $F_i$  中选定一个点  $V_i'$  作为顶点；

② 对于  $G$  中的每条边  $e$ ，画一条线  $e'$ ，并且该线仅与  $e$  相交，其连接位于  $e$  两边的面  $F_i$  中的顶点  $V_i'$  作为边。

则该图称为图  $G$  的对偶图  $G'$ 。

求解对偶图的具体步骤如下所述。

步骤 1：将配电网中所有开关闭合后转换为无向平面图  $G$ ，并生成网络邻接矩阵，确定节点最大编号  $k$ ，设  $m=1$ 。

步骤 2：判断有无与节点  $k$  相连的两个相异节点  $i$ 、 $j$ 。若不存在，则与节点  $k$  相连节点组成的支路在对偶图无对应支路。

步骤 3：使用 floyd 算法求解节点  $i$  和  $j$  之间所有节点编号都不大于  $k$  的最短路径。将该路径和路径  $ik$ 、 $jk$  共同组成第  $m$  个最小环并储存。

步骤 4：判断  $k$  是否小于 1，若不满足，则令  $k=k-1$ ， $m=m+1$ ，并返回步骤 2。若满足，各最小环选一个点作为对偶节点，并记录对偶图节点数  $m$ 。

步骤 5：搜索并记录原图  $G$  中  $m$  个最小环中每个支路对应节点之间的连接状态。

### 附录 B

附表 B1 工作日和双休日出行链结构和构成比例

Attached Table B1 Trip chain composition and proportion on weekdays and weekends

场景	出行链	出行链编号	比例/%
工作日	H-W	1	53
	H-W-S/SE/RE/OT	2	24
	H-S/SE/RE/OT	3	23
双休日	H-S/SE/RE/OT	4	35
	H-S/SE/RE/OT	5	35
	未出行	6	30

附表 B2 不同出行链的概率分布

Attached Table B2 Probability distribution of different trip chains

场景	出行链编号	上午	下午
工作日	1	N(6.92,1.24)	N(17.47,1.80)
	2	N(6.92,1.24)	N(17.47,1.80)
	3	N(6.92,1.24)	—
双休日	4	N(6.92,1.24)	—
	5	—	N(17.47,1.80)
	6	—	—

## 附录 C

附表 C1 路-网节点耦合信息

Attached Table C1 Coupling between TNN and DNN

交通节点	配电网节点	交通节点	配电网节点	交通节点	配电网节点
1	1	12	12	23	4
2	2	13	13	24	9
3	3	14	14	25	11
4	6	15	15	26	25
5	24	16	16	27	26
6	19	17	29	28	10
7	20	18	28	29	8
8	21	19	5	30	7
9	22	20	23	31	—
10	30	21	18	32	—
11	17	22	27	33	—

附表 C2 交通道路饱和度

Attached Table C2 Road saturation within a day

时段	道路饱和度 $\chi_i$	时段	道路饱和度 $\chi_i$
00:00—07:00	0.2	14:00—17:00	0.3
07:00—09:00	0.5	17:00—19:00	0.5
09:00—12:00	0.3	19:00—23:00	0.3
12:00—14:00	0.4	23:00—24:00	0.2

附表 C3 交通道路长度

Attached Table C3 Road length

道路	长度/km	道路	长度/km	道路	长度/km
(1,2)	10.2	(9,11)	10.1	(18,27)	9.7
(1,4)	10.4	(10,11)	9.0	(19,20)	10.0
(2,3)	10.3	(10,21)	10.1	(19,24)	10.4
(2,5)	10.5	(11,22)	10.2	(19,28)	8.8
(2,6)	10.6	(12,13)	10.3	(20,21)	9.1
(3,4)	10.4	(12,16)	10.6	(20,25)	10.5
(3,7)	10.7	(12,17)	10.7	(20,29)	8.9
(4,8)	10.8	(13,14)	10.4	(21,22)	10.2
(4,9)	9.9	(13,15)	10.5	(21,25)	10.5
(5,6)	10.6	(14,15)	9.5	(22,30)	11.0
(5,23)	10.3	(14,28)	9.7	(23,24)	10.4
(6,7)	9.7	(15,16)	8.6	(24,25)	9.5
(6,24)	9.4	(15,28)	8.8	(25,26)	9.6
(7,8)	10.8	(16,17)	10.7	(27,28)	9.8
(7,25)	9.5	(16,29)	8.9	(28,29)	8.9
(8,10)	10.0	(17,30)	11.0	(29,30)	11.0
(8,26)	9.6	(18,19)	8.9	—	—
(9,10)	9.9	(18,23)	10.3	—	—

## 附录 D

附表 D1 WT 参数

Attached Table D1 Parameters of WT

接入节点	输出有功上限/kW	功角上限	功角下限
3,17,21	500	0.9	-0.9

附表 D2 PV 参数

Attached Table D2 Parameters of PV

接入节点	输出有功上限/kW	功角上限	功角下限
16,19,30,31	400	0.9	-0.9

附表 D3 ESS 参数

Attached Table D3 Parameters of ESS

接入节点	充(放)电功率上限/kW	储能能量上限/kWh	储能能量初值/%	充电效率	放电效率
15	300	1800	10	0.9	1.1
32	200	1000	10	0.9	1.1

附表 D4 CB 参数

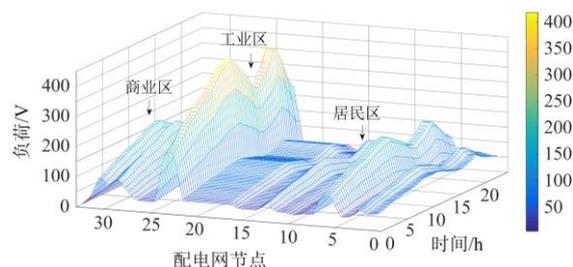
Attached Table D4 Parameters of CB

接入节点	单位容量/kvar	最大组量
5,15	50	5

附表 D5 SVC 参数

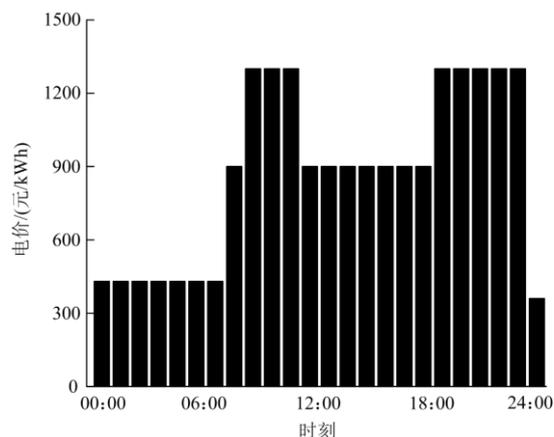
Attached Table D5 Parameters of SVC

接入节点	最小无功输出/kvar	最小无功输出/kvar
5,12,31	-100	300



附图 D1 动态负荷

Attached Fig. D1 Dynamic load



附图 D2 分时电价

Attached Fig. D2 Time-sharing price

## 参考文献

- [1] 程杉, 陈梓铭, 徐康仪, 等. 基于合作博弈与动态分时

- 电价的电动汽车有序充放电方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(21): 15-21.
- CHENG Shan, CHEN Ziming, XU Kangyi, et al. An orderly charging and discharging method for electric vehicles based on a cooperative game and dynamic time-of-use price[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(21): 15-21.
- [2] 程杉, 杨堃, 赵孟雨, 等. 计及电价优化和放电节制的电动汽车充电站优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(11): 1-8.
- CHENG Shan, YANG Kun, ZHAO Mengyu, et al. Orderly charging and discharging scheduling of an electric vehicle charging station considering price optimization and discharge behavior control[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(11): 1-8.
- [3] 刘坚, 熊英, 金亨美, 等. 电动汽车参与电力需求响应的成本效益分析——以上海市为例[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(1): 86-94.
- LIU Jian, XIONG Ying, KIM H M, et al. Economic assessment of demand response delivered by electric vehicles in Shanghai[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(1): 86-94.
- [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] 张怡, 郝思鹏. 不同场景下快速充电站的分层储能配置[J]. 供用电, 2020, 37(7): 94-100.
- ZHANG Yi, HAO Sipeng. Hierarchical energy storage configuration of fast charging station in different scenarios[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(7): 94-100.
- [6] 杨昕然, 吕林, 向月, 等. “车-路-网”耦合下电动汽车恶劣充电场景及其对城市配电网电压稳定性影响[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(10): 108-114, 128.
- YANG Xinran, LÜ Lin, XIANG Yue, et al. Electric vehicle bad charging scenario and its influence on voltage stability of urban distribution network under "vehicle-road-network" coupling[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(10): 108-114, 128.
- [7] 张谦, 王众, 谭维玉, 等. 基于MDP随机路径模拟的电动汽车充电负荷时空分布预测[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(20): 59-66.
- ZHANG Qian, WANG Zhong, TAN Weiyu, et al. Prediction of temporal and spatial distribution of electric vehicle charging load based on MDP random path simulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(20): 59-66.
- [8] CHENG S, WEI Z, SHANG D, et al. Charging load prediction and distribution network reliability evaluation considering electric vehicles' spatial-temporal transfer randomness[J]. IEEE Access, 2020, 8: 124084-124096.
- [9] 程杉, 倪凯旋, 赵孟雨. 基于Stackelberg博弈的一体化电站微电网双层协调优化调度[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(6): 49-55, 69.
- CHENG Shan, NI Kaixuan, ZHAO Mengyu. Stackelberg game based bi-level coordinated optimal scheduling of microgrid accessed with charging-swapping-storage integrated station[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(6): 49-55, 69.
- [10] 尤毅, 刘东, 于文鹏, 等. 主动配电网技术及其进展[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 10-16.
- YOU Yi, LIU Dong, YU Wenpeng, et al. Active distribution network technology and its progress[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 10-16.
- [11] 邵尹池, 穆云飞, 余晓丹, 等. “车-路-网”模式下电动汽车充电负荷时空预测及其对配电网潮流的影响[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(18): 5207-5219, 5519.
- SHAO Yinchu, MU Yufei, YU Xiaodan, et al. Spatio-temporal prediction of EV charging load and its impact on power flow of distribution network under "vehicle-road-network" mode[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(18): 5207-5219, 5519.
- [12] LUO Y, ZHU T, WAN S, et al. Optimal charging scheduling for large-scale EV (electric vehicle) deployment based on the interaction of the smart-grid and intelligent-transport systems[J]. Energy, 2016, 97: 359-368.
- [13] 程杉, 魏昭彬, 赵子凯, 等. 考虑电动汽车时空接入随机性的充电站有序充放电分散式优化[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(6): 28-35.
- CHENG Shan, WEI Zhaobin, ZHAO Zikai, et al. Decentralized optimization of orderly charging and discharging of electric vehicle charging and storage power station considering stochastic space-time access[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(6): 28-35.
- [14] FERRO G, MINCIARDI R, ROBBA M. A user equilibrium model for electric vehicles: joint traffic and energy demand assignment[J]. Energy, 2020, 198.
- [15] 刘洪, 张旭, 刘畅, 等. 考虑充电设施充裕性的电动私家车出行与充电需求时序交互分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(18): 5469-5478.
- LIU Hong, ZHANG Xu, LIU Chang, et al. Interaction

- analysis of electric private car travel and charging demand considering charging facility abundance[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(18): 5469-5478.
- [16] XIANG Y, HU S, LIU Y, et al. Electric vehicles in smart grid: a survey on charging load modelling[J]. IET Smart Grid, 2019, 2(1): 25-33.
- [17] 倪识远, 张林垚. 考虑动态重构的主动配电网多目标双层优化调度方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(20): 38-47.
- NI Shiyuan, ZHANG Linyao. Multi-objective double-layer optimal scheduling method for active distribution network considering dynamic reconfiguration[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20): 38-47.
- [18] 高红均, 刘俊勇, 沈晓东, 等. 主动配电网最优潮流研究及其应用实例[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(6): 1634-1645.
- GAO Hongjun, LIU Junyong, SHEN Xiaodong, et al. Research and application of optimal power flow in active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(6): 1634-1645.
- [19] 从鹏伟, 唐巍, 姜铖伟. 含高渗透率可再生能源的主动配电网两阶段柔性软开关与联络开关协调优化控制[J]. 电工技术学报, 2019, 34(6): 1263-1272.
- CONG Pengwei, TANG Wei, LOU Chengwei. Coordination and optimization control of two-stage flexible soft switch and contact switch in active distribution network with high permeability renewable energy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(6): 1263-1272.
- [20] 谢琳宇, 唐忠, 黄星宇, 等. 考虑分布式电源和电动汽车不确定性的双层动态配网重构[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 1-11.
- XIE Linyu, TANG Zhong, HUANG Xingyu, et al. Reconfiguration of two-layer dynamic distribution network considering uncertainty of distributed power supply and electric vehicle[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 1-11.
- [21] 赵平, 赵期期, 艾小猛. 考虑极限场景的主动配电网重构与无功电压调整联合鲁棒优化[J]. 电工技术学报, 2021, 36(增刊 2): 496-506.
- ZHAO Ping, ZHAO Qiqi, AI Xiaomeng. Joint robust optimization of active distribution network reconfiguration and reactive voltage adjustment considering limit scenario[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(S2): 496-506.
- [22] 王日安, 胡志坚. 主动配电网二阶段鲁棒日前调度优化模型及其求解方法[J]. 武汉大学学报(工学版), 2022, 55(6): 596-608.
- WANG Ri'an, HU Zhijian. Two-stage robust day-ahead scheduling optimization model and its solution method for active distribution network[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2022, 55(6): 596-608.
- [23] LIU C, WANG J, CAI W, et al. An energy-efficient dynamic route optimization algorithm for connected and automated vehicles using velocity-space-time networks[J]. IEEE Access, 2019, 7: 108866-108877.
- [24] XIANG Y, JIANG Z, GU C, et al. Electric vehicle charging in smart grid: a spatial-temporal simulation method[J]. Energy, 2019, 189.
- [25] 徐俊俊, 吴在军, 周力, 等. 考虑分布式电源不确定性的配电网鲁棒动态重构[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(16): 4715-4725.
- XU Junjun, WU Zaijun, ZHOU Li, et al. Robust dynamic reconfiguration of distribution network considering distributed power uncertainty[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(16): 4715-4725.
- [26] 徐崇博, 杨晓东, 张有兵, 等. 考虑风险管控的含智能软开关主动配电网随机运行优化方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(11): 68-76.
- XU Chongbo, YANG Xiaodong, ZHANG Youbing, et al. Stochastic operation optimization method of active distribution network with intelligent soft switch considering risk control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(11): 68-76.

收稿日期: 2021-10-26; 修回日期: 2022-01-17

作者简介:

程 杉(1981—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统运行优化与控制、智能电网能量管理与优化、智能计算及其应用等方向的研究工作; E-mail: hpucquyzu@ctgu.edu.cn

钟仕凌(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行优化与控制。E-mail: 849531238@qq.com

(编辑 魏小丽)