

# 极端天气下高速公路自洽能源系统移动电源车的优化调度

李艳波<sup>1</sup>, 刘妙阳<sup>2</sup>, 杨 凯<sup>3</sup>, 张云锐<sup>1</sup>, 吕浩楠<sup>1</sup>, 王秋才<sup>2</sup>

(1. 长安大学 能源与电气工程学院, 西安 710064; 2. 长安大学 电子与控制工程学院, 西安 710064; 3. 山东省交通规划设计院集团有限公司, 济南 250101)

**摘 要:**近年来,极端天气对高速公路电网系统造成严重破坏,如何合理调配移动电源车是目前高速公路故障抢修中亟须解决的难题。因此,本文提出了一种极端天气下高速公路移动电源车的优化调度方法。首先,利用蒙特卡洛模拟方法,通过历史天气数据和实际线路参数,构建极端天气下覆冰载荷、风力载荷和绝缘子闪络的数学模型,得到输电线路脆弱性模型,进而确定整个系统的故障情况;其次,通过蒙特卡洛模拟方法和目标函数收敛条件,求出移动电源车的最优接入点,调度移动电源车提高系统弹性;最后,利用新疆某高速公路服务区自洽能源系统数据进行仿真分析。结果表明,相比于目前常用的移动电源车接入点固定不变的方法,本文提出的调度方法使恢复供电的负荷比例提高了12%,提升了移动电源车的工作效率和自洽能源系统的弹性性能。

**关键词:**高速公路;自洽能源系统;极端天气;移动电源车调度;蒙特卡洛模拟;弹性提高

**中图分类号:**U491.8 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2025)11-3623-09

**DOI:**10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240224

## Optimal scheduling of mobile power vehicles for highway self-consistent energy systems in extreme weather conditions

LI Yan-bo<sup>1</sup>, LIU Miao-yang<sup>2</sup>, YANG Kai<sup>3</sup>, ZHANG Yun-rui<sup>1</sup>, LYU Hao-nan<sup>1</sup>, WANG Qiu-cai<sup>2</sup>

(1. School of Energy and Electrical Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064 China; 2. School of Electronic and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 3. Shandong Traffic Planning Design Institute Group Co., Ltd., Jinan 250101, China)

**Abstract:** Extreme weather in recent years has caused serious damage to the highway power grid system, how to reasonably deploy mobile power vehicles is the current highway fault repair in the urgent need to solve the problem. Therefore, this paper proposes an optimal scheduling method for mobile power vehicles on highways under extreme weather. Firstly, the Monte Carlo simulation method is used to construct mathematical models of ice-covering load, wind load and insulator flashover under extreme weather

收稿日期: 2024-03-06.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB1600202); 河南交通投资集团有限公司科技项目(HNJT2024-18, HNJT2024-35).

作者简介: 李艳波(1980-), 男, 副教授, 博士. 研究方向: 交通能源融合, 智能微电网. E-mail: ybl@chd.edu.cn

通信作者: 王秋才(1973-), 男, 副教授, 博士. 研究方向: 智能交通感知及信息处理. E-mail: qewang@chd.edu.cn

through historical weather data and actual line parameters, to obtain the vulnerability model of the transmission line, and then to determine the fault conditions in the whole system. Secondly, the Monte Carlo simulation method and the convergence condition of the objective function are used to find out the optimal access point of the mobile power vehicle, and the mobile power vehicle is dispatched to improve the system resilience. Finally, the simulation analysis is carried out by using the data of the self-consistent energy system of a highway service area in Xinjiang. The results show that compared with the commonly used method of fixing the access point of mobile power vehicles, the dispatching method proposed in this paper increases the proportion of loads that are restored to the power supply by 12%, which enhances the efficiency of mobile power vehicle and the resilience performance of the self-consistent energy system.

**Key words:** highway; self-consistent energy system; extreme weather; mobile power vehicle scheduling; Monte Carlo simulation; resilience improvement

## 0 引言

在“双碳”政策背景下,减少碳排放、实现交通能源融合发展势在必行<sup>[1]</sup>。科技部提出,围绕高速公路路网系统建立与自然禀赋相适配且具有能源利用全生命周期特性的微电网系统,推动交通能源绿色发展。高速公路自洽能源系统(Self-consistent energy system, SCES)正是在“双碳”政策背景下,以交通能源融合为理念,由“源-网-荷-储”四大主体构成的系统。但是,近年来自然灾害、恶意破坏等极端情况给高速公路带来了巨大冲击,造成长时间、大范围的停电事故频发<sup>[2]</sup>。电网作为国民生产的关键基础设施,一旦遭遇极端灾害(如台风、地震、冰雪)引发的线路故障、设备损坏、系统崩溃等,将造成难以估量的损失。同时,在战争发生时,电网也是主要的攻击目标。再加上环境恶化导致极端天气频发,从而导致高速公路配电网大面积停电事故增加。移动电源车由于配套设备结构简约、体积小、质量轻,具有灵活、机动的特性,因此能快速到达受灾现场,迅速恢复局部电力供应,为后续恢复工作奠定基础。但是,由于移动电源车配置数量有限、容量配备灵活性不高,因此如何合理调配移动电源车是目前高速公路故障抢修中亟须解决的问题<sup>[3]</sup>。

目前主要通过灾前预防阶段和灾后抢修恢复阶段两方面的优化调度提升电网弹性。在灾前预防阶段,文献[4]考虑台风场景下的移动储能灾前最优调度,提出3层鲁棒优化模型求解最佳调度路线;文献[5]为求解灾前移动储能的规划数量和位置情况,采用前两阶段随机规划模型结合逐步对冲算法求解;文献[6]根据灾前实际负荷需求和优先级情况,对移动电源车进行预先定位,故障发

生后再结合实际情况调度电源车。在灾后抢修恢复阶段,文献[7]构建两层目标函数,即上层以关键负荷恢复均衡性最佳为目标,下层以配电网经济效益最大为目标,提出应急电源车调度的动态孤岛均衡供电模型,实现同时恢复系统等权重负荷的供电;文献[8]建立基于时空网络的移动储能调度模型,配合网络重构模型实现联合恢复的目标。文献[9]通过协同调度人工维修队与移动储能,实现重要负荷的优先快速恢复;文献[10]同样考虑抢修人员与应急电源车的协同恢复策略,并利用软开关将故障电网划分为辐射状微网供电。

综上所述,现有文献在移动电源车调度方面,尤其在高速公路自洽能源系统中的应用,尚未形成系统性的解决方案;在移动电源车应用场景方面,未与交通领域充分融合,国内针对移动电源车应用于高速公路自洽能源系统的研究还相对较少。因此,本文提出了一种极端天气下高速公路移动电源车的优化调度方法。首先,构建极端灾害的数学模型,利用蒙特卡洛模拟方法,结合历史天气数据和实际线路参数,构建极端天气模型和线路故障模型,得到相应的元件脆弱性曲线模型,通过统计计算确定整个系统的脆弱性曲线及故障情况。其次,建立移动电源车调度模型得到最优接入点,最大限度地缩短调度时间,从而迅速恢复高速公路的电力供应。

## 1 极端天气模型与线路故障模型

### 1.1 覆冰载荷模型

覆冰是造成输电线路损害的主要原因,目前基于形成机制构建的典型线路结冰模型包括 Imai 模型<sup>[11]</sup>、Lenhard 模型<sup>[12]</sup>和 Makkonen 模型<sup>[13]</sup>。其中, Makkonen 模型因考虑的实际影响因素更多,

得到各领域专家的广泛认可。文献[14]仅考虑了线路覆冰的质量及覆冰引起的闪络问题,没有考虑风力、风速对线路的影响。因此,本文提出从覆冰厚度、风力强度和闪络3个方面,综合计算极端冰雪天气下输电线路的脆弱性。

首先,建立覆冰厚度计算模型,核心是计量覆冰的质量。输电线路覆冰质量不仅与气候强度、线路与气候中心的距离有关,还与气候持续时长有关,这是因为积雪是一个随时间不断积累的过程<sup>[15]</sup>。

其次,建立平面坐标系,假定灾害中心坐标为 $(u_x, u_y)$ ,输电线路等效中心坐标为 $(x_i, y_i)$ ,则覆冰载荷函数表达式为:

$$L_{ICE}(x_i, y_i, t) = \int_0^t A_1 \exp \left( -\frac{1}{2} \left( \left( \frac{x_i - u_x(s)}{\sigma_x} \right)^2 + \left( \frac{y_i - u_y(s)}{\sigma_y} \right)^2 \right) \right) ds \quad (1)$$

$$\sigma_x = \sigma_y = 0.4R \quad (2)$$

式中: $A_1$ 为冰雪灾害中心的严重程度最大值; $R$ 为冰雪灾害的中心半径; $\sigma$ 为能调节模拟冰雪灾害规模大小的参数,其值与气候的影响半径相关。

### 1.2 风力载荷模型

假定灾害中心坐标为 $(u_x, u_y)$ ,输电线路等效中心坐标为 $(x_i, y_i)$ ,则风力载荷函数表达式为:

$$L_{WIND}(x_i, y_i, t) = \left[ A_2 \exp \left( -\frac{1}{2} \left( \left( \frac{x_i - u_x(t)}{\sigma_{x1}} \right)^2 + \left( \frac{y_i - u_y(t)}{\sigma_{y1}} \right)^2 \right) \right) - A_3 \exp \left( -\frac{1}{2} \left( \left( \frac{x_i - u_x(t)}{\sigma_{x2}} \right)^2 + \left( \frac{y_i - u_y(t)}{\sigma_{y2}} \right)^2 \right) \right) \right] \quad (3)$$

式中: $A_3 < A_2$ 为冰雪灾害中的风力大小; $R$ 为冰雪灾害中风力范围的中心半径; $\sigma$ 为能调节模拟冰雪灾害中风力规模大小的参数,其中 $\sigma_{x1} > \sigma_{x2}, \sigma_{y1} > \sigma_{y2}$ ,其值与气候的影响半径相关。

### 1.3 闪络模型

闪络电压数值模型的表达式为:

$$U_f = A \times S^{-b} \times \left( 1 - \frac{H}{45.1} \right)^{3.22} \times \left( 1 - \frac{W}{45.1} \right)^{4.36} \quad (4)$$

式中: $A$ 为绝缘子覆冰程度的常数; $b$ 为绝缘子表面污染程度对覆冰绝缘子闪络电压的影响指数; $S$ 为绝缘子表面受污染程度,mg/cm<sup>2</sup>,计算公式为 $S = \frac{M}{S_{insulator}}$ ,其中 $M$ 为绝缘子表面覆盖的覆冰质量,mg; $H$ 为绝缘子的高度,km; $W$ 为每块绝缘子上覆冰的质量,kg。

### 1.4 输电线路脆弱性模型

前面3节已经介绍了冰雪灾害下输电线路的覆冰载荷模型、风力载荷模型和绝缘子闪络模型。为了建立输电线路在上述3种模型下的综合性脆弱性概率模型,需要引入一个函数将3种计算模型转换为输电线路的脆弱性概率模型。

在脆弱性模型中,极端灾害的严重程度会导致不同的故障数目 $\eta$ 。 $\eta$ 不仅是上述影响因子的连续函数,还是灾害持续时间 $t$ 的连续函数,即:

$$\eta_w(t) = f(L_{WIND}(t)) \quad (5)$$

$$\eta_i(t) = f(L_{ICE}(t)) \quad (6)$$

假设随机变量为失效时间,则期望失效时间是指数分布中的参数 $m$ ,即:

$$m(t) = \frac{1}{\eta(t)} \quad (7)$$

$$\eta(t) = a_w \eta_w(t) + a_i \eta_i(t) + a_f P_f \quad (8)$$

式中: $a_w$ 、 $a_i$ 和 $a_f$ 分别为极端暴雪灾害下风力载荷、覆冰载荷和闪络现象对输电线路造成损害的占比,一般认为 $a_w = 0.10$ , $a_i = 0.80$ , $a_f = 0.10$ 。

参数为 $m(t)$ 的指数分布的概率密度函数为:

$$f_T(t) = \begin{cases} \frac{1}{m(t)} e^{-\frac{t}{m(t)}}, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases} \quad (9)$$

在 $[t, t + \Delta t]$ 时间区间内,某段输电线路发生损坏的概率为:

$$P_{fail}([t, t + \Delta t]) = \int_t^{t+\Delta t} f_T(u) du \quad (10)$$

### 1.5 极端天气下的故障场景模拟

故障场景模拟采用蒙特卡洛模拟法,蒙特卡洛模拟法以统计抽样理论为基础,利用随机数对随机变量已有数据进行统计抽样实验或随机模拟,以求得统计量的某个数字特征,并将其作为待解决问题的数值解。蒙特卡洛模拟法作为一种广

泛应用的随机抽样方法,其优势在于灵活性高、普适性强<sup>[16]</sup>。本文根据实际场景统计的极端天气历史数据,结合蒙特卡洛模拟法建立极端天气模型。再通过构建的极端天气模型,结合各段线路的脆弱性曲线,模拟高速公路服务区微电网系统在该极端场景下的故障情况,具体评估流程如图 1 所示。

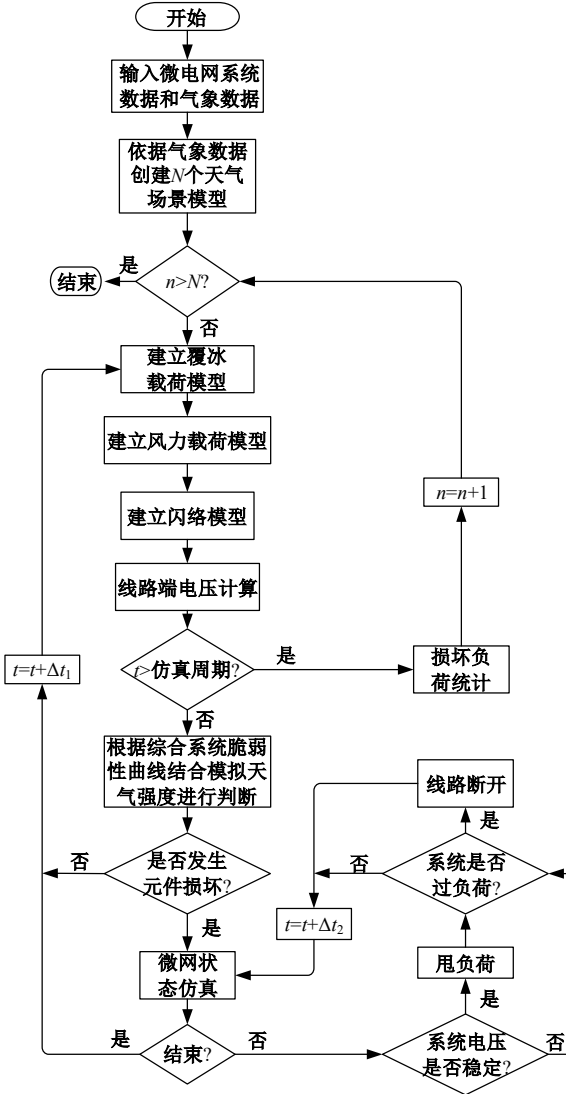


图 1 故障场景评估流程图

Fig. 1 Flowchart of fault scenario evaluation

## 2 灾后移动电源车的优化调度模型

本文提出移动电源车的灾后优化调度模型,其目标函数为当所有电源车同时为受损电力网络供电时系统整体的失负荷率最小,即以系统整体失负荷率最小为目标,通过调度移动电源车的位置最大限度地提升电网韧性,目标函数表达式为:

$$\min \left( \frac{\sum_{j \in \Omega_{\text{loss}}} P_j(t)}{\sum_{i \in \Omega_{\text{all}}} P_i(t)} \right) \quad (11)$$

式中: $\Omega_{\text{all}}$ 为整个系统内所有用电负荷的集合; $\Omega_{\text{loss}}$ 为整个系统内所有停电负荷的集合; $P_j(t)$ 为系统中某停电负荷在 $t$ 时刻缺失的有功功率值; $P_i(t)$ 为系统中某负荷在 $t$ 时刻所需的有功功率值。

移动电源车调度模型的具体约束条件如下。

### 2.1 失负荷率约束

灾后应急恢复过程中,若移动电源车的数量不足,则应优先保证一级负荷的用电需求,即:

$$0 \leq \frac{\sum_{j \in \Omega_{\text{loss}}} P_j(t)}{\sum_{i \in \Omega_{\text{all}}} P_i(t)} \leq 0.5 \quad (12)$$

### 2.2 高速公路微电网系统潮流约束

高速公路微电网系统一般呈辐射状运行,且属于中低压配电网络。根据文献[17-21]中使用的微电网系统线性化潮流模型,整个系统的潮流约束条件可表示为:

$$\sum_{h|(j,h) \in L} f_{jh,t}^p = f_{ij,t}^p + p_{m,j,t}^c + p_{j,t}^{\text{ld}} - P_{j,t}^d \quad (13)$$

$$\sum_{h|(j,h) \in L} f_{jh,t}^q = f_{ij,t}^q + q_{m,j,t}^c + q_{j,t}^{\text{ld}} - Q_{j,t}^d \quad (14)$$

$$V_{j,t} = V_{i,t} - \frac{R_{ij} f_{ij,t}^p + X_{ij} f_{ij,t}^q}{V_0} \quad (15)$$

$$f_{ij,t}^p \leq f_{ij,\max}^p \quad (16)$$

$$f_{ij,t}^q \leq f_{ij,\max}^q \quad (17)$$

$$V_{\min} \leq V_{i,t} \leq V_{\max} \quad (18)$$

$$\forall i, j \in B, ij \in L, t \in T$$

式中: $f_{ij,t}^p$ 为线路 $ij$ 在 $t$ 时刻的有功潮流; $f_{ij,t}^q$ 为线路 $ij$ 在 $t$ 时刻的无功潮流; $P_{j,t}^d$ 为 $t$ 时刻节点 $j$ 的负荷需求; $p_{j,t}^{\text{ld}}$ 为 $t$ 时刻节点 $j$ 的负荷损失量; $V_{i,t}$ 为 $t$ 时刻节点 $i$ 的节点电压; $V_0$ 为额定电压; $L$ 为整个系统中输电线路段的集合; $R_{ij}$ 为线路 $ij$ 的电阻值; $X_{ij}$ 为线路 $ij$ 的电抗值; $B$ 为输电线路两端节点的集合; $T$ 为系统修复时间。

故障线路在被修复之前,其潮流为零,即:

$$f_{ij,t}^p \leq \omega_{ij,t} \cdot f_{ij,\max}^p \quad (19)$$

$$f_{ij,t}^q \leq \omega_{ij,t} \cdot f_{ij,\max}^q \quad (20)$$

$$\forall ij \in L_0, t \in T$$

式中: $\omega_{ij,t}$ 为线路 $ij$ 在 $t$ 时刻的修复状态; $L_0$ 为故障线路集合。

### 2.3 移动电源车的调度约束

在灾后抢修恢复阶段,移动电源车的调度约

束可表示为:

$$T_{i,j,k}^{\text{mo}}(t) = \frac{L_{j,h}^{\text{eq}}}{V_i^{\text{mo}}(t)} \quad (21)$$

$$L_{j,h}^{\text{eq}} = L_{j,h,0} \left( 1 + \frac{1}{V_i^{\text{mo}}(t)} \right) \quad (22)$$

$$V_i^{\text{mo}}(t) = V_{i,0} a^{-1.7DK} \quad (23)$$

式中:  $T_{0^{\text{op}}}$  为操作接入时间段;  $T_{i,j,h}^{\text{mo}}$  为移动电源车  $i$  在线路段  $j$  和线路段  $h$  之间的移动时间;  $L_{j,h}^{\text{eq}}$  为受损线路之间的等效距离;  $V_{i,0}$  为移动电源车在理想条件下的理想车速;  $a$  为指数函数底数, 一般  $a > 1$ 。

调度过程的约束条件为:

$$\sum_{i \in \Omega_c} M_{i,j,t_0}^C = M_{j,0}^C \quad (24)$$

$$M_{i,j,t}^C + M_{i,h,t+\Delta t}^C \leq 1, \forall \Delta t < T_{0^{\text{op}}} + T_{i,j,h}^{\text{mo}}(t) \quad (25)$$

$$\sum_{j \in B} M_{i,j,t}^C \leq 1 \quad (26)$$

$$U_{i,t}^{C,\text{out}} \sum_{j \in B} M_{i,j,t}^C \leq 1 \quad (27)$$

$$U_{i,t}^{C,\text{in}} \sum_{j \in B} M_{i,j,t}^C \leq 1 \quad (28)$$

$$0 \leq P_{i,t}^{C,\text{in}} \leq P_{i,\max}^{C,\text{in}} \quad (29)$$

$$0 \leq P_{i,t}^{C,\text{out}} \leq P_{i,\max}^{C,\text{out}} \quad (30)$$

$$0 \leq Q_{i,t}^{C,\text{in}} \leq Q_{i,\max}^{C,\text{in}} \quad (31)$$

$$0 \leq Q_{i,t}^{C,\text{out}} \leq Q_{i,\max}^{C,\text{out}} \quad (32)$$

$$E_{i,t}^C = E_{i,t-\Delta t}^C + P_{i,t}^{C,\text{in}} \Delta t \cdot \eta_{\text{in}}^C - \frac{P_{i,t}^{C,\text{out}}}{\eta_{\text{out}}^C} \Delta t \quad (33)$$

$$E_{i,\min}^C \leq E_{i,t}^C \leq E_{i,\max}^C \quad (34)$$

式中:  $t_0$  为极端灾害开始侵扰的时间;  $\Omega_c$  为系统中移动电源车的集合;  $M_{i,j,t}^C$  为移动电源车  $i$  在  $t$  时刻与接入点  $j$  的连接状态;  $\eta_{\text{in}}^C$  和  $\eta_{\text{out}}^C$  分别为移动电源车的充电效率、放电效率;  $E_{i,\max}^C$  和  $E_{i,\min}^C$  分别为移动电源车容量的上下限值;  $U_{i,t}^{C,\text{in}}$  和  $U_{i,t}^{C,\text{out}}$  分别为移动电源车的充电标志与放电标志;  $P_{i,\max}^{C,\text{in}}$  和  $P_{i,\max}^{C,\text{out}}$  分别为移动电源车充电、放电的有功功率上限值;  $Q_{i,\max}^{C,\text{in}}$  和  $Q_{i,\max}^{C,\text{out}}$  分别为移动电源车充电、放电的无功功率上限值。

## 2.4 混合储能系统约束

对于整个高速公路自洽能源系统, 假设灾害来临前混合储能系统处于满电状态, 灾后该系统将配合移动电源车电网系统恢复供电。以充放电功率上下限为约束条件, 保证系统健康的使用寿命, 具体约束可表示为<sup>[22]</sup>:

$$\begin{cases} P_{s,\min}^{\text{out}} \leq P_s^{\text{out}}(t) \leq P_{s,\max}^{\text{out}} \\ P_{b,\min}^{\text{out}} \leq P_b^{\text{out}}(t) \leq P_{b,\max}^{\text{out}} \end{cases} \quad (35)$$

$$\begin{cases} P_{s,\min}^{\text{in}} \leq P_s^{\text{in}}(t) \leq P_{s,\max}^{\text{in}} \\ P_{b,\min}^{\text{in}} \leq P_b^{\text{in}}(t) \leq P_{b,\max}^{\text{in}} \end{cases} \quad (36)$$

式中:  $P_s^{\text{in}}(t)$  和  $P_b^{\text{out}}(t)$  分别为蓄电池和超级电容器在  $t$  时刻的充放电功率;  $P_{b,\min}^{\text{in}}$  和  $P_{b,\min}^{\text{out}}$  分别为蓄电池的最小充放电功率限值;  $P_{b,\max}^{\text{in}}$  和  $P_{b,\max}^{\text{out}}$  分别为蓄电池的最大充放电功率限值;  $P_{s,\min}^{\text{in}}$  和  $P_{s,\min}^{\text{out}}$  分别为超级电容器的最小充放电功率限值;  $P_{s,\max}^{\text{in}}$  和  $P_{s,\max}^{\text{out}}$  分别为超级电容器的最大充放电功率限值。

## 2.5 移动电源车的充放电功率及容量约束

移动电源车的电池充放电功率及容量需要满足以下约束条件<sup>[23]</sup>:

$$P_{i,\min}^{C,\text{in}}(t) \leq P_i^{C,\text{in}}(t) \leq P_{i,\max}^{C,\text{in}}(t) \quad (37)$$

$$P_{i,\min}^{C,\text{out}}(t) \leq P_i^{C,\text{out}}(t) \leq P_{i,\max}^{C,\text{out}}(t) \quad (38)$$

$$E_{i,\min}^C(t) \leq E_i^C(t) \leq E_{i,\max}^C(t) \quad (39)$$

式中:  $P_{i,\min}^{C,\text{in}}(t)$  和  $P_{i,\max}^{C,\text{in}}(t)$  分别为电源车电池的最小和最大充电功率;  $P_{i,\min}^{C,\text{out}}(t)$  和  $P_{i,\max}^{C,\text{out}}(t)$  分别为电源车电池的最小和最大放电功率;  $E_{i,\min}^C(t)$  和  $E_{i,\max}^C(t)$  分别为电源车电池的最小容量和最大容量。

## 3 灾后移动电源车调度模型求解方法

灾后移动电源车调度模型具体计算流程如图 2 所示。

## 4 算例分析

本文以新疆某高速公路服务区自洽能源系统为算例进行仿真分析, 其路网结构如图 3 所示。

根据各用电设备的功率能耗, 移动电源车的容量选择 800 kWh, 容量限制在 0.1~0.95 范围内, 功率选择 150 kW, 最低功率为 120 kW, 移动速度为 100 km/h, 实际配置 1 台电源车。图 3 中, B、C 两点间有一个地下过道, 供应急车辆在道路两侧调转方向。系统中配置光伏发电系统出力上下限分别为 400、300 kW; 风力发电系统出力上下限分别为 400、300 kW; 储能系统采用 HESS, 蓄电池容量为 3 858 kWh、功率为 419 kW, 超级电容器容量为 1.85 kWh、功率为 201 kW; 输电线路的电阻值为 0.085  $\Omega$ /km、电抗值为 0.315  $\Omega$ /km, 实际线路长度为表 1 中对应路段长度的 1.1 倍。

本节模拟实验的数据来源于瑞典和加拿大的极端冰雪天气事件 SC-ICE STORM 数据集。根据极端天气模型和线路故障模型仿真得到如表 2 所示的统计结果。

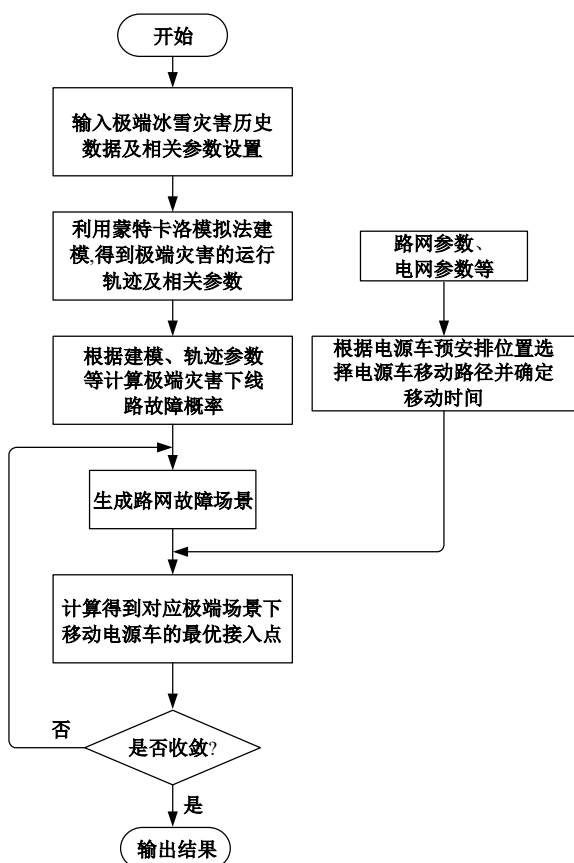


图 2 移动电源车灾后最优接入点求解流程图

Fig. 2 Flowchart for solving the optimal access point of mobile power truck after disaster

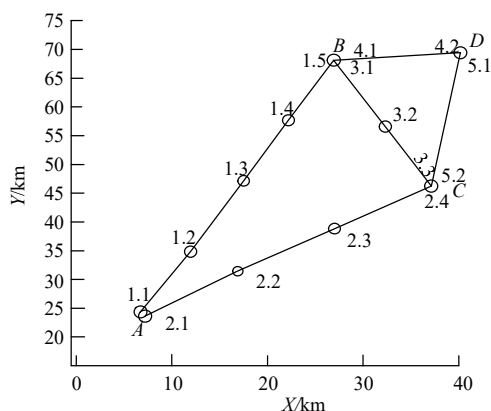


图 3 仿真算例路网结构

Fig. 3 Simulation example of road network structure

表 2 所示统计结果为随机抽取的 8 次模拟数据,其中“时间”为极端事件破坏某个路段的时间,“路段”为被破坏的路段编号。每次模拟的灾害中心是随机生成的,其到达每段线路的时间都是不确定的。以其中一组数据为例,从图 3 所示位置开始,经过 3.56 h 后到 A-B 段致使 1.3 路段发生故障。表 3 统计了 1 000 次模拟中每段线路的平均故障概率。

表 1 线路实际距离长度及通行时间

Table 1 Actual distance length and travelling time of the line

| 路段      | 距离长度/<br>km | 理论通行<br>时间/min | 参数<br>K 和 D | 实际通行<br>时间/min |
|---------|-------------|----------------|-------------|----------------|
| 1.1-1.2 | 13.3        | 8              |             | 13.3           |
| 1.2-1.3 | 15          | 9              |             | 15             |
| 1.3-1.4 | 15          | 9              |             | 15             |
| 1.4-1.5 | 16.7        | 10             |             | 16.7           |
| 2.1-2.2 | 21.7        | 13             | 0.5×0.6     | 21.7           |
| 2.2-2.3 | 18.3        | 11             |             | 18.3           |
| 2.3-2.4 | 18.3        | 11             |             | 18.3           |
| 3.1-3.2 | 15          | 9              |             | 15             |
| 3.2-3.3 | 15          | 9              |             | 15             |

表 2 故障时间及故障点

Table 2 Failure time and failure point

| 仿真 | A-B<br>时间/<br>h | A-C<br>时间/<br>h | B-C<br>时间/<br>h | B-D<br>时间/<br>h | C-D<br>时间/<br>h |
|----|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1  | —               | —               | 2.20            | 2.3             | —               |
| 2  | 3.56            | 1.3             | 3.13            | 2.2             | —               |
| 3  | 3.31            | 1.2             | 4.19            | 2.3             | —               |
| 4  | 1.61            | 1.4             | 2.83            | 2.1             | 3.91            |
| 5  | 3.90            | 1.4             | —               | —               | 4.30            |
| 6  | 1.62            | 1.3             | 2.73            | 2.1             | —               |
| 7  | —               | —               | 3.31            | 2.2             | 3.83            |
| 8  | 2.95            | 1.4             | 3.25            | 2.3             | —               |

表 3 灾害造成的线路故障概率

Table 3 Probability of line failure due to disasters

| 路段      | 故障概率    | 路段      | 故障概率    |
|---------|---------|---------|---------|
| 1.1-1.2 | 0.236 3 | 2.3-2.4 | 0.194 7 |
| 1.2-1.3 | 0.217 6 | 3.1-3.2 | 0.148 2 |
| 1.3-1.4 | 0.191 3 | 3.2-3.3 | 0.139 7 |
| 1.4-1.5 | 0.169 1 | 4.1-4.2 | 0.141 5 |
| 2.1-2.2 | 0.221 3 | 5.1-5.2 | 0.167 3 |
| 2.2-2.3 | 0.207 4 |         |         |

根据表 3 中各段线路的故障概率,确定移动电源车灾前预安排的位置。从表 3 中的数据可知,1.2 路段故障率最高,因此在极端事件来临前,提前安排电源车到 1.2 接入点处待命。

#### 4.1 提前安排移动电源车到 1.2 接入点,且不考虑移动电源车的移动调度

根据输入系统的数据和参数进行模拟实验,统计数据如图 4 所示。表 4 显示的是 1 000 次模拟统计得到的微电网系统各弹性指标值。图 4 中

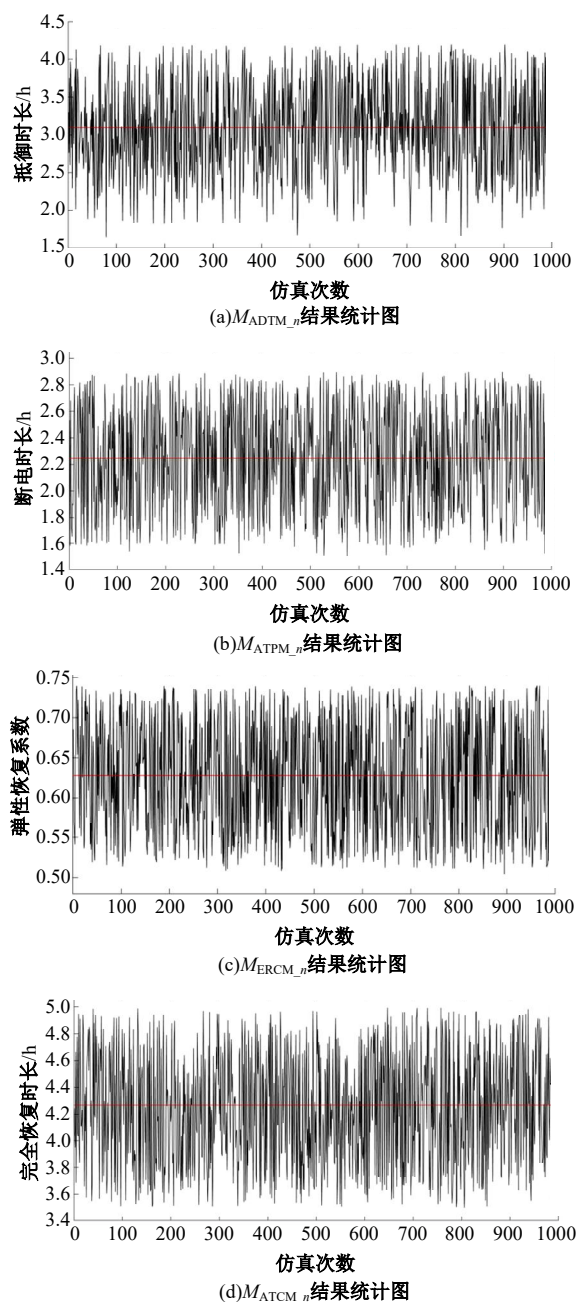


图 4 各弹性指标实验数据统计图

Fig. 4 Statistical graph of experimental data of each resilience index

表 4 微电网弹性评估指标

Table 4 Microgrid resilience assessment index

| 弹性指标 | $M_{ADTM}/h$ | $M_{ATPM}/h$ | $M_{ERCM}$ | $M_{ATCM}/h$ | $M_{ECEM}$ |
|------|--------------|--------------|------------|--------------|------------|
| 数值   | 3.09         | 2.25         | 0.626 8    | 4.27         | 4.646 0    |

每幅统计图的黑色折线代表 1 000 次模拟实验结果的统计曲线,红色直线代表 1 000 次模拟实验结果的平均值。

由表 4 可知,在不考虑移动电源车调度的情况下,微电网弹性恢复系数为 0.626 8。

## 4.2 考虑移动电源车调度并寻求最优接入点的情况

根据表 1 中每段线路的实际通行时间,可计算出移动电源车从起始地到目标地点之间  $n$  段线路的通行时间。本文采用 1 000 组极端冰雪灾害模拟数据进行建模仿真,利用蒙特卡洛模拟方法在这 1 000 组极端场景中随机抽样,结合每组场景的线路故障率,计算每组场景的最优接入点,当目标函数系统失负荷率的标准差系数  $< 0.03$  时停止抽样,在 1 000 次抽样停止后,统计每个场景下的最优接入点位置,得到最优接入点的频率分布如图 5 所示,可以看出,单台移动电源车在灾后的最优接入点为 3.2。从图 6 中可以看出,随着抽样次数的增加,目标函数的标准差系数收敛越来越接近 0.03,在抽样次数达到 800 次左右时开始低于 0.03。选取图 5 中频数较高的 4 个点接入移动电源车,其各自对应的平均失负荷率统计结果如表 5 所示。

从表 5 可以看出,当移动电源车灾后移动至接入点 3.2 时,相较于移动电源车接入点固定不

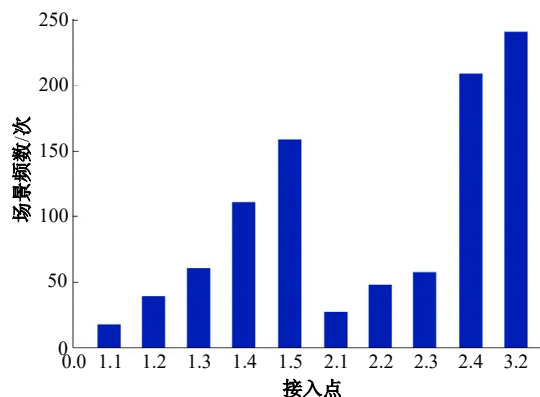


图 5 最优接入点的频数分布

Fig. 5 Frequency distribution of optimal access points

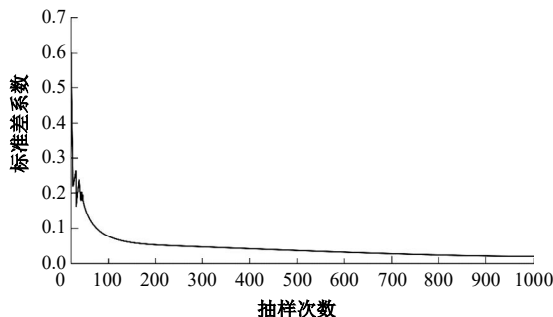


图 6 失负荷率的标准差系数收敛趋势

Fig. 6 Trend of convergence of standard deviation coefficients of lost load rates

表 5 不同接入点对应的平均失负荷率

Table 5 Average lost load ratio corresponding to different access points

| 接入点    | 1.4     | 1.5     | 2.4     | 3.2     |
|--------|---------|---------|---------|---------|
| 平均失负荷率 | 0.282 6 | 0.277 3 | 0.267 8 | 0.253 2 |

变时的弹性恢复系数来讲,其恢复供电的负荷比例提高了12%,使整个系统的弹性损失进一步降低。提前安排移动电源车到指定位置待命,能有效缩短电源车移动耗费的时间,提高了电源车的工作效率和整个高速公路自洽能源系统的弹性性能。

## 5 结束语

本文首先利用蒙特卡洛模拟方法,结合历史天气数据和实际线路参数,构建极端天气下覆冰载荷模型、风力载荷模型和闪络模型3类数学模型,得到3类模型下的综合性脆弱概率模型,并通过计算统计确定整个系统的脆弱性曲线及故障情况;其次,建立移动电源车优化调度模型,以提高系统弹性;最后,利用蒙特卡洛模拟方法和目标函数收敛条件,求出电源车最优接入点。相较于目前常用的移动电源车接入点固定不变的方法,本文提出的调度方法使恢复供电的负荷比例提高了12%,进一步降低了整个高速公路自洽能源系统的弹性损失。研究中发现,后续工作仍有改进空间,如灾后调度阶段可以考虑将人工维修队和移动电源车的规划移动路径相结合,建立综合调度模型,进一步缩短高速公路自洽能源系统完全恢复时间。此外,在未来的研究中,可以扩展灾害场景的模拟范围,包括但不限于极端天气、地质灾害、交通事故等多种情况。通过深入分析这些场景对高速公路自洽能源系统的影响,制定相应的调度策略,以提高系统在面对各类灾害时的鲁棒性和适应能力。

## 参考文献:

- [1] 刘洋, 刘吉成. 基于大数据与粒子群的清洁能源协同优化调度方法[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2023, 53(5): 1443-1448.  
Liu Yang, Liu Ji-cheng. Collaborative optimization scheduling method of clean energy based on big data and particle swarm optimization[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition),

2023, 53(5): 1443-1448.

- [2] 朱晓荣, 司羽. 考虑物理-信息-交通网耦合的配电网多时段动态供电恢复策略[J]. 电工技术学报, 2023, 38(12): 3306-3320.  
Zhu Xiao-rong, Si Yu. Multi-period dynamic power supply restoration strategy considering physical-cyber-traffic network coupling[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(12): 3306-3320.
- [3] 卢志刚, 高启明, 赵号, 等. 配电网多故障抢修中应急电源车的优化调度[J]. 太阳能学报, 2020, 41(10): 82-92.  
Lu Zhi-gang, Gao Qi-ming, Zhao Hao, et al. Optimal dispatching of emergency power supply vehicle in multi fault repair of distribution network[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2020, 41(10): 82-92.
- [4] 王钰山, 邓晖, 王旭, 等. 考虑台风时空演变的配电网移动储能优化配置与运行策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(9): 42-51.  
Wang Yu-shan, Deng Hui, Wang Xu, et al. Optimal configuration and operation strategy of mobile energy storage in distribution network considering spatial-temporal evolution of typhoon[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(9): 42-51.
- [5] Zhang Q Z, Wang Z Y, Ma S S, et al. Stochastic pre-event preparation for enhancing resilience of distribution systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 152: 111636.
- [6] Lei S B, Chen C, Zhou H, et al. Routing and scheduling of mobile power sources for distribution system resilience enhancement[J]. IEEE Transaction on Smart Grid, 2019, 10(5): 5650-5662.
- [7] 杨丽君, 赵宇, 赵优, 等. 考虑交通路网应急电源车调度的有源配电网故障均衡恢复[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(21): 170-180.  
Yang Li-jun, Zhao Yu, Zhao You, et al. Balanced fault recovery of active distribution network considering emergency power supply vehicle scheduling in traffic network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(21): 170-180.
- [8] Yao S H, Wang P, Zhao T Y. Transportable energy storage for more resilient distribution systems with multiple microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 3331-3341.
- [9] Lei S B, Chen C, Li Y P, et al. Resilient disaster recovery logistics of distribution systems: Co-optimize service restoration with repair crew and mobile power

- source dispatch[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(6): 6187-6202.
- [10] Ding T, Wang Z K, Jia W H, et al. Multiperiod distribution system restoration with routing repair crews, mobile electric vehicles, and soft-open-point networked microgrids[J]. IEEE Transaction on Smart Grid, 2020, 11(6): 4795-4808.
- [11] Imai I. Studies on ice accretion[J]. Researches on Snow and Ice, 1953, 3(1): 35-44.
- [12] Lenhard R W. An indirect method for estimating the weight of glaze on wires[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1955, 36: 1-5.
- [13] Makkonen L. Modeling power line icing in freezing precipitation[J]. Atmospheric Research, 1998, 46(1): 131-142.
- [14] Chen L Z, Shi X H, Peng B, et al. Dynamic simulation of power systems considering transmission lines icing and insulators flashover in extreme weather[J]. IEEE Access, 2022, 10: 39656-39664.
- [15] Brostrom E, Ahlberg J, Soder L. Modeling of ice storms and their impact applied to a part of the Swedish transmission network[C]//IEEE Lausanne Power Tech. Piscataway, NJ: IEEE, 2007:1593-1598.
- [16] 杨茂, 董昊. 基于数值天气预报风速和蒙特卡洛法的短期风电功率区间预测[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(5): 79-85.
- Yang Mao, Dong Hao. Short-term wind power interval prediction based on wind speed of numerical weather prediction and Monte Carlo method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(5): 79-85.
- [17] Yuan W, Wang J H, Qiu F. Robust optimization based resilient distribution network planning against natural disasters[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(6): 2817-2827.
- [18] 卫志农, 裴蕾, 陈胜, 等. 高比例新能源交直流混合配电网优化运行与安全分析研究综述[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 85-94.
- Wei Zhi-nong, Pei Lei, Chen Sheng, et al. Review on optimal operation and safety analysis of AC/DC hybrid distribution network with high proportion of renewable energy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 85-94.
- [19] Wang Z Y, Chen B K, Wang J H. Robust optimization based optimal DG placement in microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(5): 2173-2182.
- [20] 苏凯森, 杨家豪, 郑泽蔚, 等. 计及 DG 出力相关性的孤岛微电网蒙特卡洛法概率潮流[J]. 电力工程技术, 2018, 37(2): 95-101.
- Su Kai-sen, Yang Jia-hao, Zheng Ze-wei, et al. Islanded microgrids probabilistic load flow considering correlated DG output based on Monte-Carlo method [J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37 (2): 95-101.
- [21] Tan S C, Xu J X, Panda S K. Optimization of distribution network incorporating distributed generators: An integrated approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2421-2432.
- [22] 陈泽西, 孙玉树, 张妍, 等. 考虑风光互补的储能优化配置研究[J]. 电工技术学报, 2021, 36(增刊 1): 145-153.
- Chen Ze-xi, Sun Yu-shu, Zhang Yan, et al. Research on energy storage optimal allocation considering complementarity of wind power and PV[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(Sup. 1):145-153.
- [23] 杨子龙, 宋振浩, 潘静, 等. 分布式光伏/储能系统多运行模式协调控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(8): 2213-2220.
- Yang Zi-long, Song Zhen-hao, Pan Jing, et al. Multi-mode coordinated control strategy of distributed PV and energy storage system[J]. Proceeding of the CSEE, 2019, 39(8): 2213-2220.