

计及电动汽车时空不确定性的配电网灾后协同抢修恢复策略

石远钊¹, 侯 慧¹, 王振国², 罗华峰², 徐海峰¹, 潘娅英³, 李正天⁴, 林湘宁⁴

(1. 武汉理工大学 自动化学院, 湖北 武汉 430070; 2. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310014; 3. 浙江省气象服务中心, 浙江 杭州 310017; 4. 华中科技大学 电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 针对极端灾害引发配电网大规模停电、传统抢修模式效率低且资源受限问题, 提出一种计及电动汽车时空不确定性的配电网灾后协同抢修恢复策略, 引导随机分布的电动汽车主动参与抢修恢复。首先, 基于泰森多边形(VD)法则划分受灾区域, 并采用生成对抗网络(GAN)生成电动汽车起始位置集合, 以刻画其灾后随机分布特性; 其次, 设计一种融合充电贡献度与经济效益的供电激励机制, 以提高电动汽车用户的参与意愿; 随后, 联合抢修队伍与电动汽车资源, 构建以最小化灾后配电网综合抢修恢复成本为目标的优化模型, 实现故障最优抢修恢复; 最后, 以2023年台风“苏拉”影响后的广东省信宜市为例进行仿真验证, 结果表明, 所提策略可有效缩短抢修时间, 提升抢修效率。

关键词: 电动汽车; V2G; 泰森多边形法则; 生成对抗网络; 供电激励

中图分类号: TM732

文献标志码: A

DOI: 10.20204/j.sp.2025.10002

A Cooperative Post-disaster Repair and Restoration Strategy for Distribution Networks Considering Spatiotemporal Uncertainty of Electric Vehicles

SHI Yuanzhao¹, HOU Hui¹, WANG Zhenguo², LUO Huafeng², XU Haifeng¹,
PAN Yaying³, LI Zhengtian⁴, LIN Xiangning⁴

(1. School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014, China; 3. Zhejiang Meteorological Service Center, Hangzhou 310017, China; 4. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In response to large-scale power outages in distribution networks caused by extreme disasters, as well as the low efficiency and limited resources of traditional repair methods, a cooperative post-disaster repair and restoration strategy considering the spatiotemporal uncertainty of electric vehicles (EVs) is proposed to guide randomly distributed EVs to actively participate in the restoration process. First, the disaster-affected area is partitioned based on Voronoi Diagram (VD) principles, and a generative adversarial network (GAN) is used to generate the initial location sets of EVs to characterize their stochastic distribution after disasters. Second, a power supply incentive mechanism integrating charging contribution and economic benefits is designed to enhance EV owners' willingness to participate. Subsequently, repair crews and EV resources are coordinated to establish an optimization model aimed at minimizing the comprehensive post-disaster repair and restoration cost of the distribution network, thereby achieving optimal fault repair and power recovery. Finally, a simulation validation is conducted using Xinyi City, Guangdong Province, affected by Typhoon Saola in 2023 as an example. The results demonstrate that the proposed strategy can effectively shorten repair time and improve restoration efficiency.

Key words: EVs; V2G; VD principles; GAN; power supply incentive

0 引言

近年来, 全球极端灾害事件频发, 台风等极端灾害对配电网基础设施造成严重损毁, 引发配电网大规模停电事故^[1-2]。传统灾后抢修策略依赖抢修

人员现场作业^[3]、分布式电源供电支撑^[4]及线路加固与智能开关部署^[5]等。然而, 人工抢修受环境与安全风险制约效率低^[6], 分布式电源受容量与地理限制难以覆盖大规模停电场景^[7], 以及线路加固与智能开关部署成本高且极端灾害下可靠性不足^[8]。基于此, 电动汽车因其高效灵活、高渗透率及双向充放电能力, 为灾后配电网恢复提供了全新路径^[9]。

目前, 国内外学者针对电动汽车进行车网互动 (Vehicle-to-Grid, V2G) 参与配电网抢修已开展了相关研究。在灾前预调度层面, 文献[10]提出利用普

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52177110, U22B20106); 国网浙江省电力有限公司科技项目资助(B311DS24001A, B311DS25Z009)
Project Supported by the National Natural Science Foundation of China (52177110, U22B20106); State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd. Science and Technology Project(B311DS24001A, B311DS25Z009)

通私家电动汽车的分布式储能特性,建立电动汽车灾前预调度模型,但未考虑电动汽车车主供电意愿对预调度的影响。文献[11]基于电动公交车的固定线路特征设计灾前集中调度模型,但相比电动汽车,电动公交车存在数量规模有限及执行灾后客运任务等约束。此外,极端灾害的持续时间与破坏范围具有高度不确定性^[12],可能导致预调度方案失效甚至引发资源错配风险。在灾后响应层面,文献[13]揭示了灾后电动汽车在避难场所及充电站周边形成的空间聚集效应,指出无序并网行为可能导致配电网有功潮流异常波动,但未提出调度方案。文献[14]针对电动汽车群体提出灾后分布式控制策略,但未能考虑相关路网因素对电动汽车抢修的影响。文献[15]虽构建了考虑道路通行参数的调度模型,但采用确定性参数假设,未能有效刻画灾后道路损毁概率分布、交通流突变等随机因素对应急响应效能的影响。文献[16]分别从灾前预调度与灾后响应研究 V2G 参与配电网抢修,但极端灾害场景下电动汽车的随机时空分布特性尚未进行深入探讨。

虽然 V2G 技术在配电网应急抢修中能发挥重要作用,但在极端灾害事件下民众的心理恐慌与出行限制会抑制电动汽车车主的供电意愿^[17-18],因此,如何构建供电激励机制以提高电动汽车车主的供电意愿,已成为亟待解决的关键问题。文献[19]构建了包含电能采购成本、电池寿命损耗补偿及售电利润的供电激励机制,但其采用的“单一定价”策略忽视了极端灾害在不同阶段配电网需求的差异性。灾后初期需优先保障医院、通信设施供电,此时高激励强度可快速调动周边电动汽车资源,而在恢复中期则需降低激励成本以避免过载^[20-21]。此外,电动汽车车主的决策受充电焦虑^[22]、交通管制^[23]等非经济因素干扰,单一定价难以实现响应行为精准调控^[24]。

综上,针对配电网应急抢修中电动汽车随机时空分布建模不足及电动汽车车主响应不充分,提出一种计及电动汽车在时空不确定性下配电网灾后协同抢修恢复策略。主要创新点包括:1)针对灾后电动汽车时空分布难以预测的问题,提出融合泰森多边形法则(Voronoi Diagram, VD)与生成对抗网络(Generative Adversarial Network, GAN)的电动汽车灾后随机时空分布建模方法,以精准刻画其动态分布特性;2)针对灾后电动汽车车主参与灾后供电意愿较低的问题,设计直接关联充电功率贡献度与其经济效益的供电激励机制,提高电动汽车车主主动参与灾后供电的意愿。

1 电动汽车参与配电网灾后抢修恢复的总体框架

本文所提模型框架如图 1 所示,其核心在于融合时空分布建模与供电激励机制,实现电动汽车的灾后协同优化。

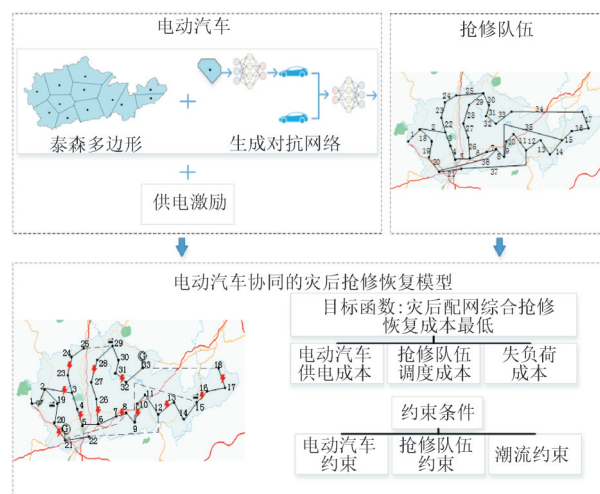


图1 模型框架图

Fig.1 Model framework diagram

首先,基于 VD 法则对受灾区域进行空间划分处理,利用 GAN 生成灾后电动汽车起始位置集,准确刻画灾后电动汽车随机时空分布特性。其次,构建将电动汽车充电功率贡献度与经济效益直接关联的供电激励机制,提高电动汽车车主供电意愿。在此基础上,联合电动汽车与抢修队伍建立以灾后配网综合抢修恢复成本最低为目标的优化模型,统筹考虑电动汽车调度、抢修队伍规划与网络潮流约束的协同关系,实现最优抢修恢复。

2 电动汽车时空不确定性模型

2.1 受灾区域划分

VD 法则是一种基于离散点集的空间划分方法。该方法通过将平面划分为若干互不重叠的独立区域,每个独立区域内的任意点到其关联中心点的距离均小于到其他中心点的距离,具有最近邻特性、几何凸性和空间全覆盖性特征^[25]。

以配电网节点为中心划分受灾区域,将包含 N 个节点的受灾区域通过 VD 法则划分为 N 个独立区域。每个独立区域内的电动汽车能够快速向本区域关联配电网节点移动,将随机分布的电动汽车资源聚集,统筹独立区域内的电动汽车实现多区域并行任务协同优化,划分结构示意图如图 2 所示。



• 泰森多边形中心点

图2 划分结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of zoning structure

2.2 灾后电动汽车起始位置生成

GAN 通过生成器 G 与判别器 D 的对抗训练来模拟数据分布,其中,生成器 G 将随机噪声转化为逼真样本,判别器 D 区分生成样本与真实数据。二者通过极大极小博弈动态优化,最终使生成数据的分布逼近真实分布^[26]。

生成器 G 采用平均绝对误差计算生成数据与真实数据之间的损失函数 L_G ,其表达式如式(1)所示。

$$L_G = \frac{1}{n_G} \sum_{r=1}^{n_G} |G(z_r) - x_r| \quad (1)$$

式中: n_G 为样本数量; $G(z_r)$ 为生成器 G 生成的数据; x_r 为真实数据, r 为样本编号。

判别器 D 采用二元交叉熵损失函数,以最大化其对 2 类数据的区分能力。判别器损失函数 L_D 如式(2)所示:

$$L_D = -\frac{1}{n_G} \sum_{r=1}^{n_G} [y_r \log D(x_r) + (1 - y_r) \log (1 - D(G(z_r)))] \quad (2)$$

式中: y_r 为样本标签,1 为实际数据,0 为生成数据; $D(x_r)$ 为判别器 D 对实际数据的判别结果; $D(G(z_r))$ 为判别器 D 对生成数据的判别结果。

基于 VD 法则划分的独立区域,生成器 G 接收电动汽车初始位置集的区域类型编码及地理约束条件,生成灾后电动汽车位置分布数据;判别器 D 则验证基本样本中空间坐标与区域类别之间的映射一致性。经对抗训练输出灾后电动汽车起始位置集,电动汽车起始位置生成模型如图 3 所示。

Fréchet Inception Distance(FID)是一种用于评估生成模型性能的指标,通过计算生成数据与真实数据在 Inception 网络特征空间中的多元正态分布距离,能够敏感捕捉电动汽车位置分布的高阶统计特征。FID 通过计算 2 个多维特征变量间均值与协方差矩阵的关系,衡量生成样本与真实样本间分布距离,数值越低代表生成样本分布越接近真实样本分布^[26]。

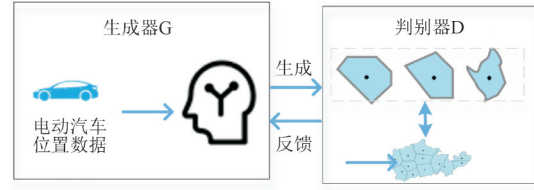


图3 电动汽车起始位置生成模型

Fig.3 EV initial location generation model

$$P_{FID} = \frac{1}{2} \left(\mu_r - \mu_g \right)^2 + T_r \left(C_r + C_g - 2 \sqrt{C_r C_g} \right) \quad (3)$$

式中: P_{FID} 为 FID; μ_r 为真实杆塔样本均值; μ_g 为生成杆塔样本均值; $T_r(\cdot)$ 为矩阵迹运算; C_r 为真实杆塔样本协方差; C_g 为生成杆塔样本协方差; g 为生成样本编号。

2.3 供电激励机制

为提高电动汽车车主参与台风灾后供电恢复的意愿,构建将电动汽车充电功率的贡献度与经济效益直接关联的供电激励机制,建立如式(4)所示的供电激励机制。

$$R_m = a_1 T_{k,m}^{\text{stay}} P^{\text{ev}} \quad (4)$$

式中: R_m 为电动汽车 m 的供电激励; a_1 为收益系数,将电动汽车供电功率转为供电收益; $T_{k,m}^{\text{stay}}$ 为电动汽车 m 在供电口 k 所停留时间; P^{ev} 为电动汽车充电功率。

3 电动汽车协同的灾后抢修恢复模型

3.1 目标函数

电动汽车协同的灾后抢修恢复模型以灾后配电网综合抢修恢复成本最低为目标,主要包含电动汽车供电成本、抢修队伍调度成本及失负荷成本等 3 部分,如式(5)所示。

$$\min C^{\text{grid}} = \min (C^{\text{ev}} + C^{\text{team}} + C^{\text{loss}}) \quad (5)$$

式中: C^{grid} 为配电网综合抢修恢复成本; C^{ev} 为电动汽车供电成本; C^{team} 为抢修队伍调度成本; C^{loss} 为失负荷成本。

电动汽车供电成本由所有电动汽车供电激励构成,如式(6)所示。

$$C^{\text{ev}} = \sum_m^L R_m = \sum_m^L \sum_k^H a_1 T_{k,m}^{\text{stay}} P^{\text{ev}} \quad (6)$$

式中: L 为电动汽车数量; H 为电动汽车供电口数量。

灾后路网通行能力存在不确定性,基于传统欧氏距离的路径规划方法难以满足抢修恢复的实际需求^[27]。为此,本文基于地图应用程序获取道路受损数据以构建灾后交通网络,采用 Dijkstra 算法计算最短可行路径^[28],并将以路径长度作为抢修队伍

调度成本的核心指标。抢修队伍调度成本 C^{team} 表达式为:

$$C^{\text{team}} = \sum_i^N \sum_j^N \sum_n^O a_2 y_{ij,n}^R d_{ij} \quad (7)$$

式中: N 为系统所有节点; O 为抢修队伍总数; a_2 为路程系数, 将调度距离转为调度成本; $y_{ij,n}^R$ 为决策变量, 指抢修队伍 n 是否由节点 i 前往节点 j ; d_{ij} 为节点 i 到节点 j 之间距离。

配电网灾后恢复阶段的失负荷成本可量化为各节点负荷缺失量造成的经济损失总和 C^{loss} , 如式(8)所示。

$$C^{\text{loss}} = \sum_t^T \sum_i^N a_3 z_{i,t} P_{i,t}^{\text{loss}} \quad (8)$$

式中: T 为抢修恢复所有时段; a_3 为电价系数, 将失负荷功率转为失负荷成本; $z_{i,t}$ 为节点状态变量, 指节点 i 在 t 时刻的状态; $P_{i,t}^{\text{loss}}$ 为节点 i 在 t 时刻的失负荷量。

3.2 约束条件

3.2.1 电动汽车约束

电动汽车参与配电网供电恢复的调度时, 需确保电动汽车车主在完成供电任务后仍能保留足够的电量以满足出行需求^[29]。电动汽车停留时间约束如式(9)所示。

$$T_{k,m}^{\text{stay}} \leq \frac{c_{k,m}^{\text{ev}} - c_{k,m}^{\text{back}}}{P^{\text{ev}}} \quad (9)$$

式中: $c_{k,m}^{\text{ev}}$ 为电动汽车 m 到达供电口 k 时自身容量; $c_{k,m}^{\text{back}}$ 为电动汽车 m 离开供电口 k 时自身容量。

电动汽车输出功率不应超过供电口的容量限制。电动汽车输出功率约束如式(10)所示。

$$P_{k,t}^{\text{ev}} \leq P^{\text{ev}} * n_{k,t}^{\text{ev}} \quad (10)$$

式中: $P_{k,t}^{\text{ev}}$ 为电动汽车 t 时刻接入供电口 k 的最大输出有功功率; $n_{k,t}^{\text{ev}}$ 为电动汽车 t 时刻接入供电口 k 的功率系数。

抢修供电过程中电动汽车应满足时空约束式(11):

$$\sum_t^T f_{k,m,t}^{\text{ev}} = \sum_t^T l_{k,m,t}^{\text{ev}} \quad (11)$$

式中: $f_{k,m,t}^{\text{ev}}$ 为电动汽车 m 在 t 时刻是否到达供电口 k ; $l_{k,m,t}^{\text{ev}}$ 为电动汽车 m 在 t 时刻是否离开供电口 k 。

电动汽车参与抢修供电的时间应满足连续性, 连续性约束如式(12)所示。

$$(1 - y_{ij,m}^{\text{ev}}) * M^{\text{ev}} \leq |T_{i,m}^{\text{ev}} + T_{i,m}^{\text{ev,stay}} + T_{ij,m}^{\text{ev,d}}| \quad (12)$$

式中: $y_{ij,m}^{\text{ev}}$ 为决策变量, 表示电动汽车 m 是否由节点 i 前往节点 j ; M^{ev} 为电动汽车抢修时间极值; $T_{i,m}^{\text{ev}}$ 为

电动汽车 m 到达节点 i 的时间; $T_{i,m}^{\text{ev,stay}}$ 为电动汽车 m 在节点 i 抢修所花费时间; $T_{ij,m}^{\text{ev,d}}$ 为电动汽车 m 由节点 i 到节点 j 所花费时间。

3.2.2 抢修队伍约束

在抢修任务分配中, 为确保抢修队伍的唯一性^[30], 需确保每个故障点仅由 1 支队伍处理。抢修队伍唯一性约束如式(13)所示。

$$\sum_n^O x_{i,n}^R = 1 \quad (13)$$

式中: $x_{i,n}^R$ 为节点 i 是否由抢修队伍 n 选取。

此外, 抢修队伍在故障点间的移动路径需满足流量守恒, 具体约束如式(14)一式(15):

$$\sum_i^N y_{ij,n}^R = x_{i,n}^R \quad (14)$$

$$\sum_j^N y_{ij,n}^R = x_{i,n}^R \quad (15)$$

抢修队伍参与抢修供电的时间应满足连续性约束见式(16)。

$$(1 - y_{ij,n}^R) * M^R \leq |T_{i,n}^R + T_{i,n}^{\text{R,stay}} + T_{ij,n}^{\text{R,d}}| \quad (16)$$

式中: M^R 为抢修队伍抢修时间极值; $T_{i,n}^R$ 为抢修队伍 n 到达节点 i 的时间; $T_{i,n}^{\text{R,stay}}$ 为抢修队伍 n 在节点 i 抢修所花费时间; $T_{ij,n}^{\text{R,d}}$ 为抢修队伍 n 由节点 i 到节点 j 所花费时间。

抢修队伍需要完成配电网所有故障点的抢修恢复, 约束条件如式(17)所示。

$$\sum_i^N \sum_n^O x_{i,n}^R = n^{\text{fault}} \quad (17)$$

式中: n^{fault} 为台风灾害后配网故障点总数。

3.2.3 潮流约束

配电网运行时各节点需满足功率平衡约束, 其数学表达式为^[31]:

$$P_{i,t}^{\text{in}} + P_{i,t}^{\text{source}} - P_{i,t}^{\text{loss}} - P_{i,t}^{\text{load}} = 0 \quad (18)$$

$$Q_{i,t}^{\text{in}} + Q_{i,t}^{\text{source}} - Q_{i,t}^{\text{loss}} - Q_{i,t}^{\text{load}} = 0 \quad (19)$$

式中: $P_{i,t}^{\text{in}}, Q_{i,t}^{\text{in}}$ 分别为节点 i 在 t 时刻所输入的有功功率与无功功率; $P_{i,t}^{\text{source}}, Q_{i,t}^{\text{source}}$ 分别为节点 i 在 t 时刻电源的有功功率与无功功率; $P_{i,t}^{\text{loss}}, Q_{i,t}^{\text{loss}}$ 分别为节点 i 在 t 时刻的有功失负荷功率与无功失负荷功率; $P_{i,t}^{\text{load}}, Q_{i,t}^{\text{load}}$ 分别节点 i 在 t 时刻的有功负荷与无功负荷。

传输线功率应满足上下限约束, 如式(20)一式(21)所示^[32]:

$$|P_{i,t}^{\text{in}}| \leq P_1^{\text{max}} \quad (20)$$

$$|Q_{i,t}^{\text{in}}| \leq Q_1^{\text{max}} \quad (21)$$

式中: $P_1^{\text{max}}, Q_1^{\text{max}}$ 分别为传输线有功功率上限与无功

功率上限。
各发电机组出力应满足上下限约束：

$$0 \leq P_{i,t}^{source} \leq P_i^{max} \tag{22}$$

$$0 \leq Q_{i,t}^{source} \leq Q_i^{max} \tag{23}$$

式中： P_i^{max} 、 Q_i^{max} 分别为节点 i 所有机组有功出力上限与无功出力上限。

4 算例分析

2023 年 9 月 2 日第 9 号台风苏拉(2023)登陆广东省,造成广东多地发生配电网故障,累计经济损失达 8.72 亿元^[33]。选取受灾严重的广东省信宜市配电网作为研究对象,其配电网络拓扑结构与 IEEE33 节点标准测试系统有高度相似。通过将该地区实际故障数据映射至测试系统,构建兼具地域灾害特征与仿真普适性的计算案例,最后在 PyCharm 中调用 Gurobi10.0.3 求解器对该模型进行求解。

4.1 参数设置

台风苏拉(2023)造成广东省信宜市造成多处停电,信宜市系统故障情况如图 4 所示。在 IEEE 33 节点配电系统中,共存在 13 处故障节点,3 个电动汽车供电口及 1 个抢修队伍出发点。其中,13 个配网故障点如表 1 所示,电动汽车供电口分别位于节点 14、节点 20 及节点 31,抢修队伍出发点则位于节点 32^[34]。

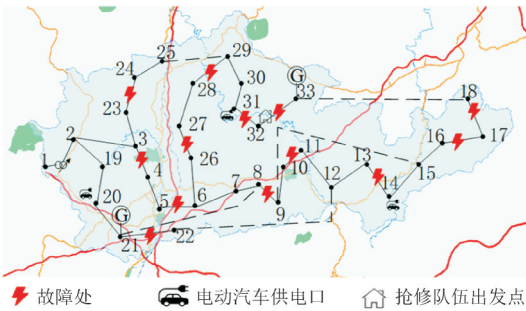


图4 信宜市系统故障情况
Fig.4 Power system fault scenario in Xinyi city

表 1 13 个配电网故障点
Table 1 13 distribution network fault points

故障点	修复时间	故障点	修复时间
3—4	1.25	21—22	1
5—6	1	23—24	1
8—9	1	26—27	1.5
10—11	1	28—29	1
13—14	1.5	31—32	1
16—17	1.25	32—33	1.5
17—18	1.25		

台风灾后交通路况复杂多变,本研究通过百度地图获取台风灾害后的离线交通路况数据,在 ArcGIS 平台中将原始 187 个节点交通网络与配电网 IEEE 33 节点拓扑进行异构系统耦合,并采用 Dijkstra 算法计算配电网各节点最短路径^[28]。灾后交通路况如图 5 所示,配电网各节点交通线路通行时间如表 2 所示。

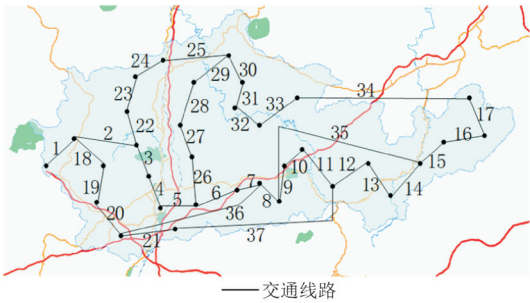


图5 灾后交通路况
Fig.5 Post-disaster traffic conditions

表 2 配电网各节点交通线路通行时间
Table 2 Traffic route travel times for distribution network nodes

线路	通行时间	线路	通行时间	线路	通行时间	线路	通行时间
1	0.25	2	0.45	3	0.21	4	0.22
5	0.21	6	0.34	7	0.21	8	0.28
9	0.32	10	0.19	11	0.34	12	0.28
13	0.31	14	0.29	15	0.19	16	0.39
17	0.33	18	0.29	19	0.26	20	0.39
21	0.3	22	0.25	23	0.28	24	0.27
25	2	26	0.28	27	0.28	28	0.32
29	0.31	30	0.21	31	0.19	32	0.19
33	0.34	34	2	35	中断	36	中断
37	2						

为快速恢复灾后供电,信宜市电力部门派遣 5 支抢修队伍参与抢修工作,同时,该地区有 330 辆电动汽车车主可协同参与供电恢复工作,相关仿真参数如表 3 所示。

表 3 仿真参数
Table 3 Simulation parameters

计算参数	数值	计算参数	数值
$a_1/[\text{元} \cdot (\text{kWh})^{-1}]$	2	$a_2/[\text{元} \cdot (\text{km})^{-1}]$	3.5
$a_3/[\text{元} \cdot (\text{kWh})^{-1}]$	3	$P^{ev}/\text{kW} \cdot \text{h}^{-1}$	20
M^{ev}/h	40	M^R/h	40
$H/\text{个}$	3	$L/\text{辆}$	330
$O/\text{个}$	5	$n^{\text{fault}}/\text{个}$	13

4.2 电动汽车协同的灾后恢复

以信宜市配电网 33 节点为 VD 中心划分受灾区域,将该受灾区域通过 VD 法则划分为 33 个独立区域,划分结果如图 6 所示。以充电桩位置作为电动汽车初始位置集,生成电动汽车初始位置集区域类型编码,并计算充电桩位置与各配电网节点的欧式距离作为电动汽车初始位置集地理约束条件。



图6 信宜市33个独立区域划分

Fig.6 Division of Xinyi city into 33 independent zones

生成器 G 接收电动汽车初始位置集区域类型编码及地理约束条件,生成灾后电动汽车位置分布数据,判别器 D 验证空间坐标—区域类别的映射一致性,经对抗训练输出灾后电动汽车起始位置集。GAN 的损失函数迭代及 FID 值迭代分别如图 7 和图 8 所示。

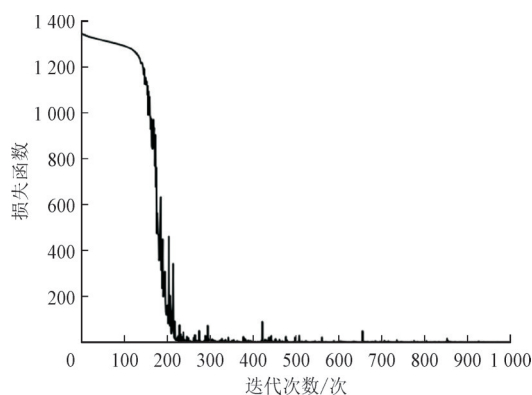


图7 损失函数迭代

Fig.7 Loss function iteration

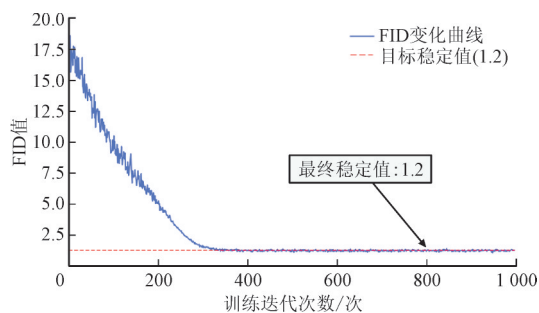


图8 FID值迭代

Fig.8 FID value iteration

经过 300 次迭代,损失函数趋于稳定,模型接近收敛,FID 稳定在 1.2。将第 1 000 次迭代结果输出作为灾后电动汽车起始位置数据集,各节点的电动汽车集群与各节点的距离分布特征如图 9 所示。所生成的 330 辆电动汽车起始位置分布于各个独立区域,各车辆距所属 VD 中心点的空间距离分布在 0.5~6.5 km 区间,相较其他中心点距离最短。

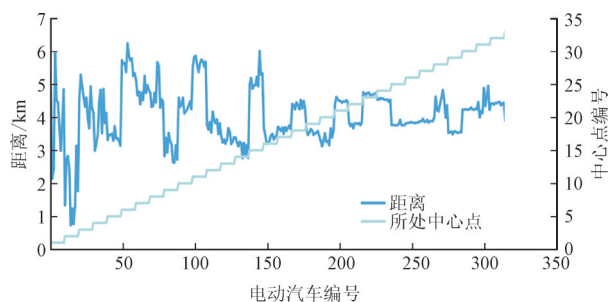


图9 各节点电动汽车集群对应节点的距离分布

Fig.9 Distance distribution characteristics of electric vehicle clusters at each node relative to their corresponding nodes

各电动汽车从起始位置出发前往对应 VD 中心点,按照要求对各供电口进行灾后供电。电动汽车供电持续时间的分布如图 10 所示。从图 10 可知,供电时间在 0.5~2 h 范围内的累计占比达 67%,构成主要应急供电能力。其中,供电时间在 0.75~1 h 的区间占比为 27%,表明多数车辆电池系统在灾后仅能维持基础设备运转约 1 h。供电时间超过 2 h 后,电动汽车的供电能力急剧下降。

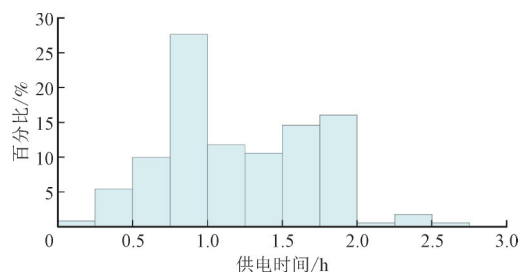


图10 电动汽车供电时间的分布

Fig.10 Distribution of EV power supply duration

电动汽车供电激励如图 11 所示。供电激励主要分布于 20~80 元区间(占比 84%),其中供电激励在 60~80 元区间占比最高(33%),表明大多数参与者可获得可观经济回报。此外,最高供电激励为 105.91 元,显示出该供电激励机制可以激发电动汽车车主主动参与台风灾害后供电恢复的意愿。

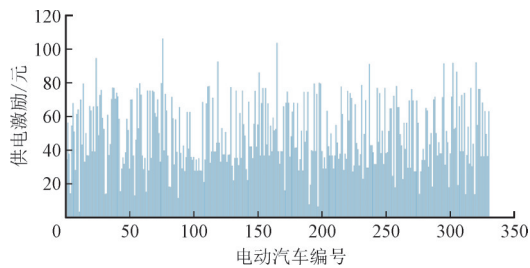


图 11 电动汽车供电激励
Fig.11 EV power supply incentives

4.3 方案对比

为验证所提策略的有效性,设置不含电动汽车参与和含电动汽车参与 2 种故障场景进行对比分析。

在不含电动汽车参与场景下,抢修队伍作为配电网故障修复的唯一执行主体,其调度仿真结果如图 12 所示。在 5 支抢修队伍中,抢修队伍 5 依次前往故障点 32、故障点 23、故障点 21、故障点 3 执行抢修,耗时最长,累计达 10.64 h。

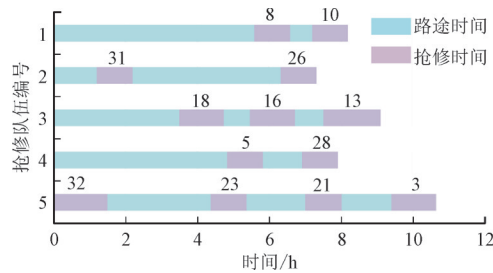


图 12 调度仿真结果(不含电动汽车)
Fig.12 Scheduling simulation results (without EVs)

含电动汽车参与场景下,抢修队伍的调度仿真结果如图 13 所示。在 5 支抢修队伍中,抢修队伍 4 耗时最长,共花费 10.25 h。相比无电动汽车参与,整体抢修时间缩短了 0.39 h,有效提高了抢修效率。

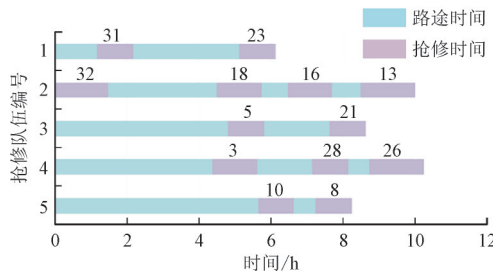


图 13 调度仿真结果(含电动汽车)
Fig.13 Scheduling simulation results (with EVs)

2 种场景下的抢修恢复成本如表 4 所示。在含电动汽车参与的场景中,虽需额外支付电动汽车供电成本 14 376 元及抢修队伍调度成本增量 283.5 元,但通过缩短停电时长使失负荷成本降低 29 682 元,最终实现总成本从 147 978.5 元降至 132 956

元,净成本节约 15 022.5 元,边际成本效益比为 1:2.06,表明电动汽车参与配电网应急恢复具有显著的经济可行性。

表 4 2 种场景下的抢修恢复成本
Table 4 Repair and recovery costs under two scenarios
元

目标函数	不含电动汽车参与	含电动汽车参与
C^{ev}	0.00	14 376.00
C^{team}	4 948.50	5 232.00
C^{loss}	143 030.00	113 348.00
C^{grid}	147 978.50	132 956.00

供电端口出力情况如图 14 所示。在运行初期(0—4 h),电动汽车供电口的功率输出持续增长,主要归因于 2 个因素:(1)在调度指令下达初期,配电网系统尚未完成大部分故障抢修作业,导致初始阶段可用供电资源有限;(2)随着时间推移,响应调度的电动汽车车主自各起始点陆续抵达指定供电节点,使得参与供电的车辆规模逐步扩大。至第 4 h,各供电节点功率叠加达到峰值,供电口功率输出达到稳定维持阶段。从第 7 h 起,抢修队伍完成大部分故障抢修作业,配电网系统随着对电动汽车的供电需求降低,供电端口功率输出呈现逐渐下降。

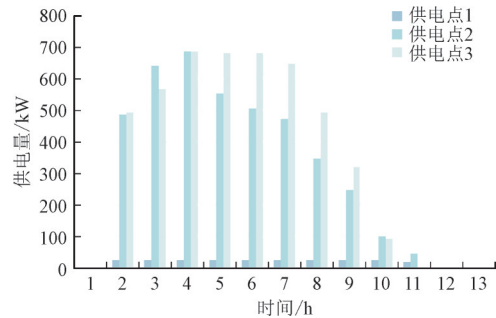


图 14 供电口出力
Fig.14 Output characteristics of power supply node

5 结论

针对配电网灾后抢修中电动汽车时空分布建模不足及车主响应意愿较低问题,本文提出一种计及电动汽车时空不确定性的配电网灾后协同抢修恢复策略,并以台风苏拉(2023)过境后的广东省信宜市为例进行仿真验证。主要研究结论如下:

1)基于 VD 法则的空间划分方法能够将复杂的受灾区域转化为结构化调度单元,结合 GAN 生成的电动汽车初始分布数据集。仿真结果表明,所生

成的电动汽车起始位置符合实际空间约束条件,为抢修资源的高效聚合与调度提供了数据基础。

2)所构建的供电激励机制将电动汽车充电功率贡献度与经济效益动态关联,可为大多数参与者提供具有吸引力的回报水平,激发了电动汽车车主主动参与台风灾害后供电恢复的意愿。

3)以灾后配电网综合抢修恢复成本最低为目标的优化模型,在信宜市配电网案例中表明出明显的抢修效率提升和成本节约效果,表明所提模型能够兼顾经济性与抢修效率,为提升灾后配电网弹性恢复能力提供了新途径。

参考文献

- [1] 侯慧,吴文杰,魏瑞增,等.基于注意力机制的CNN-LSTM-XGBoost台风暴雨电力气象混合预测模型[J].智慧电力,2024,52(10):96-102.
HOU Hui, WU Wenjie, WEI Ruizeng, et al. CNN-LSTM-XGBoost hybrid prediction model of typhoon rainfall and power meteorology based on attention mechanism[J]. Smart Power, 2024, 52(10): 96-102.
- [2] HOU H, TANG J Y, ZHANG Z W, et al. Resilience enhancement of distribution network under typhoon disaster based on two-stage stochastic programming[J]. Applied Energy, 2023, 338: 120892.
- [3] WU W J, HOU H, ZHU S H, et al. An intelligent power grid emergency allocation technology considering secondary disaster and public opinion under typhoon disaster[J]. Applied Energy, 2024, 353: 122038.
- [4] 魏瑞增,王磊,梁永超,等.台风灾害下电力抢修队伍智能调拨技术研究[J].智慧电力,2023,51(1):123-130.
WEI Ruizeng, WANG Lei, LIANG Yongchao, et al. Research on intelligent allocation technology of power repair teams under typhoon disasters[J]. Smart Power, 2023, 51(1): 123-130.
- [5] 姜萌萌,佟永吉,陈明丰,等.基于灾害条件的主动配电网快速重构策略研究[J].智慧电力,2021,49(5):85-92.
JIANG Mengmeng, TONG Yongji, CHEN Mingfeng, et al. Research on fast reconstruction strategy of active distribution network under disaster conditions[J]. Smart Power, 2021, 49(5): 85-92.
- [6] 朱承治,姜凯华,姜文东,等.台风灾害下电网输电设备故障预测技术综述[J].高压电器,2025,61(5):10-19.
ZHU Chengzhi, JIANG Kaihua, JIANG Wendong, et al. Overview of fault prediction technology of power grid transmission equipment under typhoon disaster[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(5): 10-19.
- [7] 金海翔,边晓燕,黄阮明,等.计及风电波动的电-气综合能源系统台风灾中应急调度[J].电测与仪表,2025,62(7):128-139.
JIN Haixiang, BIAN Xiaoyan, HUANG Ruanming, et al. Emergency scheduling strategy of integrated electricity-gas energy system considering wind-power fluctuation in typhoon disaster[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(7): 128-139.
- [8] 李宁,胡佳乐,詹晓暄,等.故障关联矩阵下弹性配电网可靠性评估[J].西安工程大学学报,2024,38(2):1-8.
LI Ning, HU Jiale, ZHAN Xiaoxuan, et al. Reliability assessment of elastic distribution network based on fault correlation matrix[J]. Journal of Xi'an Poly-technic University, 2024, 38(2): 1-8.
- [9] 孙科,陈文钢,陈佳佳,等.基于电动汽车的极端场景多微电网韧性提升策略研究[J].电力系统保护与控制,2023,51(24):53-65.
SUN Ke, CHEN Wengang, CHEN Jiajia, et al. A resilience enhancement strategy for multi-microgrid in extreme scenarios based on electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(24): 53-65.
- [10] 刘达夫,钟剑,杨祺铭,等.基于V2G与应急通信的配电网信息物理协同快速恢复方法[J].电力系统自动化,2024,48(7):147-158.
LIU Dafu, ZHONG Jian, YANG Qiming, et al. Fast recovery method for distribution network through cyber-physical collaboration based on vehicle to grid and emergency communication[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(7): 147-158.
- [11] ZHANG B, ZHANG L, TANG W, et al. Coordinated restoration method for electric buses and network reconfigurations in distribution systems under extreme events[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2024, 10(5): 1994-2003.
- [12] YIN W Q, ZHUANG K, FAN P C, et al. Resilient unit commitment against extreme cold events considering decision-dependent uncertainty-featured EV demand response[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2025, 167: 110552.
- [13] LIU W, LIU Y Y, YANG Y B, et al. Power restoration model for distribution networks after extreme rainstorm disasters based on electric vehicle travel characteristics[J]. Energy Reports, 2023, 9 (Supplement1): 372-380.
- [14] CHURCHILL M, MONROE J, BRISTOW D, et al. Using electric vehicles to enhance power outage resilience—an agent-based modeling approach[J]. Heliyon, 2024, 10(11): e32104.
- [15] 苏粟,韦存昊,陈奇芳,等.考虑道路抢修和负荷恢复的电动汽车分层调度策略[J].电力系统自动化,2022,46(12):140-150.
SU Su, WEI Cunhao, CHEN Qifang, et al. Hierarchical scheduling strategy for electric vehicle considering road repair and load restoration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(12): 140-150.
- [16] 谢宇峥,章德,杨祺铭,等.台风灾害下考虑修复不确定性和V2G的弹性城市电网动态供电恢复方法[J].电网与清洁能源,2024,40(6):107-114.
XIE Yuzheng, ZHANG De, YANG Qiming, et al. A dynamic power supply restoration method for re-silient urban power grids considering repair uncertainty and V2G under typhoon disaster[J]. Power Grid and Clean Energy, 2024, 40(6): 107-114.
- [17] 杨祺铭,李更丰,别朝红,等.台风灾害下基于V2G的城市配电网弹性提升策略[J].电力系统自动化,2022,46(12):130-139.
YANG Qiming, LI Gengfen, BIE Chaohong, et al. Vehicle-to-grid based resilience promotion strategy for urban distribution network

- under typhoon disaster[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(12): 130-139.
- [18] LI Y, TE H J, LAI C M. Assessing power grid vulnerability to extreme weather: The impact of electric vehicles and energy storage systems[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 112: 115534.
- [19] 胡思洋, 廖凯, 杨健维, 等. 基于V2G技术的城市电网供电恢复策略[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(6): 53-61.
HU Siyang, LIAO Kai, YANG Jianwei, et al. Power supply restoration strategy of urban power grid based on V2G technology [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(6): 53-61.
- [20] 庞凯元, 王一铮, 文福拴, 等. 计及通信失效的输电系统信息物理协同恢复策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(3): 58-67.
PANG Kaiyuan, WANG Yizheng, WEN Fushuan, et al. A coordinated cyber-physical restoration strategy for transmission systems considering communication failure[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(3): 58-67.
- [21] 刘俊琳, 朱振山, 温步瀛. 基于V2G潜力模糊评估与移动储能协调调度的灾后供电恢复策略[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(9): 89-97.
LIU Junlin, ZHU Zhenshan, WEN Buying. Post-disaster power supply restoration strategy based on V2G potential fuzzy evaluation and mobile energy storage coordinated scheduling[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(9): 89-97.
- [22] 马艳红, 张炜函. 考虑充放电成本的V2G参与用户细分及激励机制研究[J]. 智慧电力, 2024, 52(5): 31-36, 51.
MA Yanhong, ZHANG Weihuan. Research on V2G user segmentation and incentive mechanism considering charging and discharging costs[J]. Smart Power, 2024, 52(5): 31-36, 51.
- [23] KAWAMOTO Y, NAKASHIMA A, KATO N. Construction of ad-hoc public safety communications networks using EVs as base stations in disaster scenarios[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(5): 7114-7123.
- [24] DU Y, ZHANG J X, CHEN Y T, et al. Impact of electric vehicles on post-disaster power supply restoration of urban distribution systems [J]. Applied Energy, 2025, 383: 125302.
- [25] 程东亚, 张小林, 李红波. 变形泰森多边形理论在乡村快递点布局影响因素分析中的应用[J]. 地球信息科学学报, 2024, 26(9): 2140-2160.
CHENG Dongya, ZHANG Xiaolin, LI Hongbo. Application of the deformed thiesen polygon in the analysis of layout influence factors for rural express delivery points[J]. Journal of Geo-information Science, 2024, 26(9): 2140-2160.
- [26] 侯慧, 徐海峰, 王少华, 等. 含降雨量修正的台风灾害下输电杆塔数据机理联合故障概率预测[J]. 高电压技术, 2025, 51(4): 1654-1662.
HOU Hui, XU Haifeng, WANG Shaohua, et al. Data mechanism joint failure probability prediction of transmission tower with rainfall correction under typhoon disaster[J]. High Voltage Technology, 2025, 51(4): 1654-1662.
- [27] ZHANG X, DONG Z H, HUANGFU F Y, et al. Strategic dispatch of electric buses for resilience enhancement of urban energy systems [J]. Applied Energy, 2024, 361: 122897.
- [28] 朱利锋. 基于Dijkstra算法的混联配电网故障定位方法[J]. 电子设计工程, 2023, 31(10): 97-100, 105.
ZHU Lifeng. Fault location method of hybrid distribution network based on Dijkstra algorithm[J]. Electronic Design Engineering, 2023, 31(10): 97-100, 105.
- [29] 许守东, 王建, 李铭益, 等. 极端气象灾害下考虑MESS主动调控的配电网故障恢复策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(12): 45-57.
XU Shoudong, WANG Jian, LI Mingyi, et al. Distribution network fault recovery strategy considering active control of an MESS in extreme weather[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(12): 45-57.
- [30] 卢明, 郭志明, 孟高军, 等. 输电线路气象风险精细化建模及气象灾害的在线预警防御策略[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(1): 208-217.
LU Ming, GUO Zhiming, MENG Gaojun, et al. Refined meteorological risk modeling of transmission lines and online warning and defense strategies of meteorological disasters[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(1): 208-217.
- [31] 荣烜曼, 别朝红, 黄玉雄, 等. 城市弹性电网极端灾害防御与恢复技术[J]. 供用电, 2024, 41(8): 15-24, 53.
RONG Xuanman, BIE Zhaozhong, HUANG Yuxiong, et al. Extreme disaster defense and recovery technologies for urban resilient grid [J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(8): 15-24, 53.
- [32] 梁小华, 杨欢红, 薛冰, 等. 一种配电网开路潮流转移危险线路的识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(23): 11-17.
LIANG Xiaohua, YANG Huanhong, XUE Bing, et al. Identification method of dangerous lines in distribution network open-circuit power flow transfer[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(23): 11-17.
- [33] LIANG Y, WEI R, HE H, et al. Fault Analysis of Guangdong Power Grid in China during 2023 super typhoon Saola [C]//2024 9th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE), Shanghai, China, 2024: 1763-1767.
- [34] 侯慧, 徐海峰, 朱韶华, 等. 融合交通态势修正的台风灾害后多维度智能调拨策略[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(5): 127-134.
HOU Hui, XU Haifeng, ZHU Shaohua, et al. Multi-dimensional intelligent allocation strategy integrating traffic situation correction after typhoon disaster[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(5): 127-134.

(责任编辑 杨海波)

收稿日期: 2025-06-03; 修改日期: 2025-09-15

作者简介: 石远钊(2002), 男, 湖北黄石人, 硕士, 主要研究方向为电力系统风险评估。E-mail: shiyuanzhao@whut.edu.cn

侯慧(1981), 女, 通信作者, 湖北武汉人, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统风险评估、能源互联网等。E-mail: hushou@126.com