

文章编号: 1006-2467(2023)09-1165-11

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2022.152

考虑地震攻击交通网影响的配电网 韧性评估及提升策略

颜文婷¹, 杨 隆², 李长城¹, 罗 伟¹

(1. 广西大学 电气工程学院, 南宁 530004; 2. 国网湖南省电力有限公司超高压变电公司, 长沙 410007)

摘 要: 严重的地震灾害不仅会造成配电网大面积停电, 还会损坏交通网, 阻碍配电网恢复资源的运输, 进而减缓配电网恢复。考虑地震攻击交通网的影响, 提出地震灾害下配电网的韧性评估方法及韧性提升策略。首先, 基于地震动峰值加速度建立反映地震灾害与交通-配电网故障概率关系的地震攻击模型, 量化地震灾害对交通-配电网的影响, 并生成交通-配电网故障场景。其次, 引入配电网抢修队等待道路修复疏通时间, 提出配电网韧性评估指标。再次, 构建考虑故障线路抢修、道路修复疏通以及应急资源调度的配电网恢复双层优化模型并求解, 上层优化模型以最小失电负荷量为目标, 下层优化模型以最短配电网抢修队等待道路修复疏通时间为目标。最后, 采用 12 节点交通网与 IEEE33 节点配电网耦合算例, 验证所提韧性指标的可行性以及恢复方法的有效性。结果表明: 考虑地震攻击交通网影响的配电网韧性评估指标更准确, 所提的恢复策略能有效提升地震灾害下配电网韧性。

关键词: 地震灾害; 配电系统韧性; 交通-配电网; 韧性评估指标; 恢复策略

中图分类号: TM 711

文献标志码: A

Resilience Evaluation and Enhancement Strategy of Distribution Network Considering Impact of Seismic Attack on Transportation Networks

YAN Wenting¹, YANG Long², LI Changcheng¹, LUO Wei¹

(1. School of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. State Grid Hunan Extra High Voltage Substation Company, Changsha 410007, China)

Abstract: Serious earthquake disasters not only cause power outages in distribution network, but also destroy transportation networks, which hinders the transportation of resources for restoration of distribution network and slows down the restoration. This paper proposes an improved resilience evaluation method and a resilience enhancement strategy of distribution network considering the effects of seismic attack on transportation networks. First, a seismic attack model is established to describe the relation between earthquake disasters and failure probability of transportation-distribution networks based on peak ground acceleration. The impact of earthquake disasters on transportation-distribution networks is quantified, and the failure scenarios are generated. Then, a resilience evaluation index is proposed by

收稿日期: 2022-05-07 修回日期: 2022-08-12 录用日期: 2022-08-31

基金项目: 广西自然科学基金项目(2020GXNSFBA297069)

作者简介: 颜文婷(1996-), 硕士生, 从事电力系统恢复与韧性研究。

通信作者: 李长城, 博士, 助理教授; E-mail: lichangcheng@gxu.edu.cn.

introducing the waiting time for road repair of emergency repair teams. Afterwards, a bi-level optimization model for distribution network restoration considering the fault line repair, the road repair, and the emergency resource scheduling is established and solved. The upper layer aims at the minimum power loss load, while the lower layer takes the minimum waiting time of the repair team as the goal. Finally, case studies on a coupling example of a 12-node transportation network and an IEEE 33-node distribution network verify the feasibility of the improved resilience index and the effectiveness of the proposed method. The results show that the resilience index considering seismic attack on transportation networks is accurate, and the restoration strategy can effectively enhance the resilience of distribution network in earthquake disasters.

Key words: earthquake disaster; distribution system resilience; transportation-distribution networks; resilience evaluation index; restoration strategy

近年来,国内外地震灾害频发,给人们的生命财产带来极大的威胁.配电网在突发性强、破坏性大的地震灾害下易损性较高,主要表现为电力设备在地震发生的短时间内遭到大规模破坏^[1-4].因此,构建具有抵御灾害能力的配电网十分必要.通常,网络拓扑结构灵活多变的配电网^[5]可以通过调整自身的拓扑结构以及运行方式有效应对小概率极端自然灾害.

韧性评估指标被用于衡量配电网应对极端自然灾害的抵抗能力及灾后快速恢复能力^[6-8].文献[9-10]中分别从自然灾害发生的随机性、影响程度和故障的不确定性等方面构建配电网韧性评估指标.文献[11]中考虑网架重构和灾区复电过程,构建吸收率、适应率和修复速率的韧性三角指标.文献[12-13]中以系统功能曲线的缺失面积定义配电网韧性.文献[14]中针对地震灾害,从鲁棒性、快速性和冗余性 3 方面构建海岛综合能源系统的韧性评估指标.然而,地震灾害可能导致大面积交通网损坏,影响抢修资源的调度^[15],上述研究提出的韧性评估指标均未考虑交通网受损的影响,因此可能导致韧性评估结果不够客观.

为提升配电网韧性以应对极端灾害攻击,可分别研究灾前、灾时、灾后阶段对应的韧性提升措施.针对灾前规划防御阶段,文献[16]中提出线路加固和储能配置相结合的配电网韧性提升方法.文献[17]中分析地震灾害时灾前抵抗阶段与灾时降额阶段配电网韧性,但未考虑灾后恢复阶段的韧性提升措施.灾后恢复阶段主要考虑应急抢修资源优化调度和协同多源恢复以提升配电网韧性^[18].文献[19]中根据灾后配电网故障特点,提出基于重构及非重构孤岛的微网差异化恢复运行方法.相较于单个微网,文献[20-22]中考虑多微网的协同作用,有效增

强配电网韧性.不同于微网,分布式电源具有灵活度高、响应快等优点^[23],因此文献[24]中提出接入分布式电源提升配电网韧性的策略.由于移动应急资源的调度受交通网影响,所以文献[25]中研究了灾后网络重构与移动式储能优化调度的策略以提高故障恢复速度.文献[26-27]中协同分布式电源或移动应急电源恢复失电负荷,加快灾后配电网恢复速度.但上述研究均未考虑受损交通网的影响,不适用于地震灾害后的恢复工作.文献[28]中在应急资源调度中考虑受损交通网影响,但在抢修过程中未考虑受损道路清理过程.实际情况下,地震灾害容易引发大量道路中断,如何从受损交通网的角度考虑应急资源调度与故障负荷恢复,还需进一步研究.

针对上述问题,在地震灾害破坏交通网与配电网背景下,提出考虑地震攻击交通网影响的配电网韧性评估指标及灾后韧性提升策略.首先,根据地震峰值加速度建立地震灾害下配电网和交通网的易损性模型,分析配电网线路与交通网道路的故障概率,模拟构建地震灾害场景集.其次,引入配电网抢修队等待道路修复疏通时间,提出地震灾害下配电网韧性评估指标.再次,提出同时考虑故障线路抢修、道路疏通以及应急资源调度的配电网恢复策略,以提升地震灾害下配电网韧性.最后,以 12 节点交通网与 IEEE33 节点配电网耦合算例验证所提方法的有效性.

1 地震灾害下交通-配电网故障概率分析

地震灾害发生后,交通网与配电网都将受到不同程度的损坏,例如架空电线杆倒塌造成配电网线路损坏,道路损坏造成交通网受损从而影响抢修资源的调度等.一般而言,电线杆、线路和道路的受损

概率与地震等级和离震源中心的距离直接相关.因此,可以拟合地震多发区域的电线杆与道路所在位置的地震动峰值加速度(Peak Ground Acceleration, PGA)来计算电线杆与道路的受损概率^[29],用于模拟地震灾害场景,表示为

$$\lg V_{\text{PGA}} = a_1 + a_2 M + a_3 \lg[d_{s-k} + a_4 \exp(a_5 M)] \quad (1)$$

式中: V_{PGA} 为地震动峰值加速度; M 为地震动强度; d_{s-k} 为震源与场地的距离; a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 为模型系数.

1.1 地震灾害下配电网故障模型

地震灾害下,配电网线路的损坏主要由电线杆倒塌率决定,即地震中电线杆承载力达到或超过倒塌极限值的条件概率,如下所示:

$$P(C | M = x) = \phi\left(\frac{\ln V_{\text{PGA}} - \ln \theta}{\beta}\right) \quad (2)$$

式中: $P(C | M = x)$ 为电线杆在给定的地震动强度 $M = x$ 下发生倒塌的概率; $\phi(\cdot)$ 为标准正态累积分布函数; θ 为倒塌强度中位数,即结构倒塌概率为 50% 时对应的地震动强度; β 为地震动强度指标的标准差,反映采用不同地震动记录计算结果的离散性.

θ 和 β 计算如下:

$$\ln \theta = \frac{1}{K} \sum_{b=1}^K V_{\text{PGA},b} \quad (3)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{K+1} \sum_{b=1}^K \left(\ln \frac{V_{\text{PGA},b}}{\theta}\right)^2} \quad (4)$$

式中: K 为地震动记录的个数; $V_{\text{PGA},b}$ 为第 b 次地震发生对应地震动峰值加速度的值.

线路正常运行的必要条件是该线路上的电线杆均处于完好状态.因此,线路故障概率为

$$P_i = 1 - \prod_{k=1}^m (1 - P_k) \quad (5)$$

式中: P_i 为配电网第 i 条线路发生故障的概率; m 为线路段中电线杆的数量; P_k 为线路段中第 k 个电线杆发生故障的概率.

1.2 地震灾害下道路易损性模型

对比分析已有的地震灾害资料^[30],将道路受损程度分为道路完好、轻微受损、中度受损、严重受损、完全毁坏 5 个等级,主要特征如附录表 1 所示.

道路易损性分析是将道路划分为若干个单位长度的路段,计算各路段峰值加速度,并确定路段易损性函数来计算路段受损概率.单位路段受损概率服从正态分布,单位长度路段在 $V_{\text{PGA},k}$ 下不同破坏程度对应的概率为

$$P(V_{\text{PGA},k}, c_l) = \phi\left(\frac{\ln(V_{\text{PGA},k}/c_l)}{\zeta}\right) \quad (6)$$

式中: $V_{\text{PGA},k}$ 为电线杆 k 开始发生倒塌时地震动峰值加速度的值; c_l 为第 l 条道路受损程度均值,其标准差取常数 ζ . 因此,事件 E_1, E_2, E_3, E_4, E_5 的概率分别为

$$\left. \begin{aligned} P(V_{\text{PGA},k}, E_1) &= 1 - P(V_{\text{PGA},k}, c_1) \\ P(V_{\text{PGA},k}, E_2) &= P(V_{\text{PGA},k}, c_1) - P(V_{\text{PGA},k}, c_2) \\ P(V_{\text{PGA},k}, E_3) &= P(V_{\text{PGA},k}, c_2) - P(V_{\text{PGA},k}, c_3) \\ P(V_{\text{PGA},k}, E_4) &= P(V_{\text{PGA},k}, c_3) - P(V_{\text{PGA},k}, c_4) \\ P(V_{\text{PGA},k}, E_5) &= P(V_{\text{PGA},k}, c_4) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: E_1, E_2, E_3, E_4, E_5 分别表示道路完好、轻微受损、中度受损、严重受损以及完全毁坏.

2 地震灾害下配电网韧性评估

2.1 典型配电网韧性曲线

典型的配电网韧性评估包括抵御灾害能力和故障恢复能力两方面,如图 1 所示.图中: $S(t)$ 为配电网的功能函数; t_0 为灾害发生的时刻; t_1 为灾害对系统的影响最大的时刻; t_2 为故障开始抢修的时刻; t_3 为所有负荷复电、系统开始正常运行的时刻; $A_1 \sim A_4$ 分别为配电网系统韧性曲线的各区域面积.

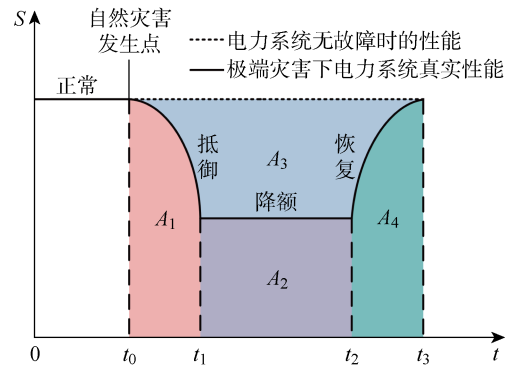


图 1 配电网系统韧性曲线

Fig. 1 Resilience curve of distribution network

2.2 地震灾害下配电网韧性评估指标

与台风、冰灾等极端天气灾害不同,地震灾害持续时间较短,但对配电网破坏程度更高.在故障恢复过程中,地震灾害导致的交通网受损会影响抢修队的抢修进度以及应急资源调度.因此,在传统配电网韧性评估的基础上考虑抢修队等待道路修复疏通时间,提出配电网韧性评估指标,表示为

$$R_n = \sum_{f=1}^F \sum_{l=1}^L P_f P_l \frac{A_2 + A_4}{A_2 + A_3 + A_4} \frac{t_3 - t_1 - t_w}{t_3 - t_1} \quad (8)$$

式中: P_f, P_l 分别为配电网、交通网故障场景的概率; F 和 L 分别为配电网中线路故障和交通网中道

路故障的场景数目; t_w 为配电网抢修队等待道路修复疏通时间, R_n 的取值范围为 $0 \sim 1$. 当 $t_w = 0$ 时, 说明交通网不影响配电网抢修进程; t_w 越大, 受损交通网对配电网抢修的消极影响越大、抢修速度越慢, 从而导致配电网在地震灾害下韧性越低. 由于地震对配电网的影响是瞬时的, $t_0 \sim t_1$ 的时间非常短, 所以在考虑韧性时可忽略图 1 中 A_1 的面积.

2.3 计及交通的配电网地震灾害下韧性评估流程

地震灾害期间, 线路断线、输电塔倒塌等事故造成电网拓扑结构不断变化, 各元件故障概率和系统的状态也随外界影响的变化而变化. 同时, 道路的损坏也会影响后续的恢复过程. 因此, 地震灾害下考虑交通网影响的配电网韧性评估是随地震影响状态不断更新迭代的过程, 其流程图如附录图 1(a) 所示, 具体步骤如下:

步骤 1 输入地震灾害强度以及配电网与地震震源中心的距离、配电网各线路的故障概率、交通网各道路的故障概率以及配电网和交通网的基本数据.

步骤 2 通过轮盘赌算法生成地震灾害下配电网故障场景集、产生各场景的概率以及各故障点修复时间, 具体流程详见附录图 1(b).

步骤 3 利用轮盘赌算法生成地震灾害下交通网故障场景集、产生各场景的概率以及各道路修复清理时间. 当道路完全毁坏时, 则认定道路无法修复清理, 需进行灾后重建, 即假设修复清理时间为无穷大, 具体流程详见附录图 1(c).

步骤 4 分别选定配电网、交通网故障场景, 更新该场景下配电网故障线路、故障修复时间、交通网故障道路、道路修复清理时间以及配电网停电区域.

步骤 5 根据灾后恢复策略模型, 生成配电网恢复策略. 并根据优化恢复策略对配电网进行修复, 具体流程详见附录图 1(d).

步骤 6 更新配电网、交通网场景, 重复步骤 4~6 直到配电网、交通网场景集全部场景模拟完成.

步骤 7 更新系统状态, 利用式(8)计算配电网地震灾害下韧性指标.

3 地震灾害下配电网韧性提升策略研究

为加快灾后故障配电网恢复速度, 提升灾后恢复阶段配电网应对地震灾害的韧性, 考虑采用协同故障线路抢修、道路修复疏通以及应急资源调度的恢复策略, 建立地震灾害下配电网韧性提升的双层优化模型.

3.1 上层优化模型

3.1.1 目标函数 上层优化模型包括配电网故障抢修策略优化以及应急资源调度两方面. 其中, 故障抢修策略通过优先恢复重要负荷和大负荷, 减少配电网损失电量. 应急资源调度通过应急电源车对配电网重要负荷供电, 提高配电网地震灾害下韧性. 同时, 充分发挥应急电源车的灵活性, 为重要负荷供电, 协调配电网故障抢修与应急电源车, 最大程度减少配电网在地震灾害中损失电量. 上层优化模型考虑抢修车、应急电源车的行驶时间、负荷量、负荷重要性等因素构建使配电网失电量最小化的目标函数:

$$\min f(\mathbf{X}_e, \mathbf{X}_r, \mathbf{X}_l) = \sum_{i=1}^{Y+V} (t_{re,i} \sum_{j \in \Omega_{N,i}} \omega_j P_j) - \sum_{r=1}^D t_{pe,r} \sum_{j \in \Omega_r} \omega_j P_j \quad (9)$$

式中: \mathbf{X}_e 为配电网故障线路抢修顺序; \mathbf{X}_r 为交通网故障道路修复清理顺序; \mathbf{X}_l 为应急电源车调度方案集合; $t_{re,i}$ 为第 i 条故障线路从故障到恢复所需要的时间; $\Omega_{N,i}$ 为第 i 条故障线路恢复前, 配电网失电节点集合; ω_j 为负荷权重系数; P_j 表示负荷 j 的有功功率; Y 和 V 分别为配电网故障线路数与配电网联络线数量; D 为应急电源车供电的停电区域数量; $t_{pe,r}$ 为应急电源车为第 r 个停电区域供电时间; Ω_r 为第 r 个停电区域内应急电源车供电节点集合.

3.1.2 约束条件

(1) 拓扑约束.

配电网需要在辐射网状结构下运行, 因此定义两个状态变量 α_{aj} 和 $\rho_{a,j}$, 建立树模型, 从而保证潮流流向变化不影响配电网辐射状运行.

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{aj} + \alpha_{ja} &\leq 1 \\ \sum_{(a \rightarrow j) \in \Delta} \alpha_{aj} &= \mu_a \leq 1, \quad \forall a \in \Omega \\ \sum_{h=1}^H \rho_{a,j} &= \sum_{a \in \Omega} \mu_a \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: α_{aj} 和 α_{ja} 为 0-1 状态变量, 当电流从节点 a 流向 j 时, α_{aj} 值为 1, α_{ja} 值为 0; 当电流从节点 j 流向 a 时, α_{aj} 值为 0, α_{ja} 值为 1; μ_a 为流入节点 a 的电流矢量和; $\rho_{a,j}$ 为 0-1 变量, 表示节点 a, j 之间开关的闭合断开, 当开关闭合时, 其值为 1; 断开时, 其值为 0; Δ 为所有线路集合; H 为配电网系统开关总数; Ω 为配电网所有节点集合.

(2) 负荷约束.

地震灾害发生后, 应急电源车对停电区域进行供电. 当恢复负荷量较大时, 考虑切除可控的普通负

荷,保证重要负荷供电的调控。应急电源车的负荷约束为

$$\sum_{j \in \Omega_r} \kappa_{r,j} P_j \leq P_E \quad (11)$$

式中: $\kappa_{r,j}$ 为 0-1 变量,当应急电源车能够维持节点 j 供电时,其值为 1;否则按照负荷重要程度进行负荷削减,其值为 0; P_E 为应急电源车最大输出功率。

(3) 容量约束。

由于应急电源车容量受限,当应急电源车进行下一步调度时,必须满足对停电区域供电需求,保证该停电区域负荷正常恢复。其约束为

$$E_{\text{loss}} + \sum_{r \in \mathbf{X}_1} \sum_{j \in \Omega_r} \kappa_{r,j} P_j t_{\text{pe},r} \leq E_{\text{total}} \quad (12)$$

式中: E_{loss} 为应急电源车行驶损耗能量; E_{total} 为应急电源车总能量。

(4) 潮流约束。

$$\left. \begin{aligned} P_j(t) &= U_j(t) \sum_{a=1}^n U_a(t) (G_{aj} \cos \omega_{aj}(t) + B_{aj} \sin \omega_{aj}(t)) \\ Q_j(t) &= U_j(t) \sum_{a=1}^n U_a(t) (G_{aj} \sin \omega_{aj}(t) + B_{aj} \cos \omega_{aj}(t)) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中: $Q_j(t)$ 为节点 j 上注入的无功功率; G_{aj} 和 B_{aj} 分别为节点 a 和节点 j 之间支路的电导和电纳; $\omega_{aj}(t)$ 为节点 a 和节点 j 的电压相角差; $U_j(t)$ 和 $U_a(t)$ 分别为节点 j 和 a 在时间段 t 内的电压幅值,且

$$U_{j,\min} \leq U_j(t) \leq U_{j,\max}, \quad \forall j \in \Omega \quad (14)$$

式中: $U_{j,\max}$ 和 $U_{j,\min}$ 分别为节点 j 上电压幅值上、下限,分别取额定电压的 1.05 倍和 0.95 倍。

(5) 故障线路恢复时间。

$t_{\text{re},i}$ 主要包括故障抢修时间、抢修车行驶时间以及配电网抢修队等待时间。因此, $t_{\text{re},i}$ 可表示为

$$t_{\text{re},i} = \begin{cases} t_{\text{s},i} + d_i/\epsilon v + t_{\text{w},i}, & i \in \Lambda_r \\ t_{\text{o},i}, & i \in \Lambda_v \end{cases} \quad (15)$$

式中: $t_{\text{s},i}$ 为抢修队抢修第 i 条故障线路的时间; d_i 为上一条故障线路到第 i 条故障线路的距离; ϵ 为交通网因地震损坏后轻度受损道路对车辆行驶速度的影响系数; v 为抢修车在交通网正常时的行驶速度; $t_{\text{w},i}$ 为抢修队抢修第 i 条故障线路因中度或严重受损道路修复疏通所需要的等待时间; $t_{\text{o},i}$ 为联络线接通需要的时间; Λ_r 和 Λ_v 分别为故障线路和联络线的集合。

(6) 应急电源车供电时间。

$t_{\text{pe},r}$ 可由应急电源车调度后配电网故障恢复时间之和与应急电源车行驶速度计算得到:

$$t_{\text{pe},r} = \sum_{i \in \Lambda_r} t_{\text{re},i} - \frac{d_r}{\epsilon v} \quad (16)$$

式中: Λ_r 为配电网抢修队从第 $r-1$ 个到第 r 个应急电源车供电区域内故障线路完成恢复期间,待恢复配电网故障线路的集合; d_r 为上一个应急电源车接入点到停电区域 r 应急电源车接入点的距离。

(7) 配电网故障线路修复累计时间。

故障线路累计恢复时间可由每条故障线路恢复需要的时间表示,具体如下所示:

$$t_{\text{ev},i}(\mathbf{X}_e) = \sum_{b=1}^{i-1} t_{\text{re},b} \quad (17)$$

式中: $t_{\text{ev},i}(\mathbf{X}_e)$ 为配电网故障抢修顺序为 \mathbf{X}_e 时,前 $i-1$ 个故障线路恢复时间的累积。

3.2 下层优化模型

3.2.1 目标函数 为提高配电网故障恢复效率,下层优化模型考虑对故障道路修复疏通进行优化,构建使配电网抢修队等待道路修复疏通时间总和最小化的目标函数:

$$\min t_w(\mathbf{X}_r, \mathbf{X}_e) = \sum_{i \in \Lambda_Y} t_{\text{w},i} \quad (18)$$

式中: $t_w(\mathbf{X}_r, \mathbf{X}_e)$ 为抢修队等待道路修复疏通时间总和。

3.2.2 约束条件

(1) 抢修队等待时间。

当配电网线路抢修与道路清理同时进行, $t_{\text{w},i}$ 可表示为

$$t_{\text{w},i} = \begin{cases} t_{\text{rd},i}(\mathbf{X}_r) - t_{\text{ev},i}(\mathbf{X}_e), & t_{\text{rd},i}(\mathbf{X}_r) \geq t_{\text{ev},i}(\mathbf{X}_e) \\ 0, & t_{\text{rd},i}(\mathbf{X}_r) < t_{\text{ev},i}(\mathbf{X}_e) \end{cases} \quad (19)$$

式中: $t_{\text{rd},i}(\mathbf{X}_r)$ 为道路修复疏通顺序为 \mathbf{X}_r 时,故障线路 i 抢修途中遇到的受损道路及此前受损道路修复时间的累计。

(2) 受损道路修复累计时间:

$$t_{\text{rd},i}(\mathbf{X}_r) = \sum_{y=1}^i \sum_{z=1}^Z \tau_{z,y} t_{z,y} d_z \quad (20)$$

式中: Z 为中度、严重受损道路数量; $\tau_{z,y}$ 为 0-1 变量,若受损道路 z 与故障线路 y 关联,其值为 1,否则为 0; $t_{z,y}$ 为破损道路 z 每千米道路修复时间; d_z 为受损道路 z 长度。

3.3 双层模型求解

在双层优化模型中,上、下层优化模型控制各自的决策变量,从而优化目标函数。上层模型将优化的配电网抢修顺序 \mathbf{X}_e 和故障线路抢修时间 t_{re} 传递给下层模型,下层模型基于上层优化策略求解出交通网道路修复疏通顺序 \mathbf{X}_r 和抢修队等待道路修复疏通时间 t_w 后,将下层模型的 t_w 与 \mathbf{X}_r 传递给上层模

型. 配电网和交通网抢修队的行驶路径采用经典弗洛伊德算法求取最短路径. 上层模型通过下层优化模型反馈结果, 更新配电网抢修顺序 \mathbf{X}_e 以及故障恢复的总时间 t_{ev} , 如此循环到结果收敛或者达到设定的最大迭代次数, 求出配电网故障抢修、交通网道路修复疏通以及应急资源调度协调优化策略, 具体模型求解流程如图 2 所示.

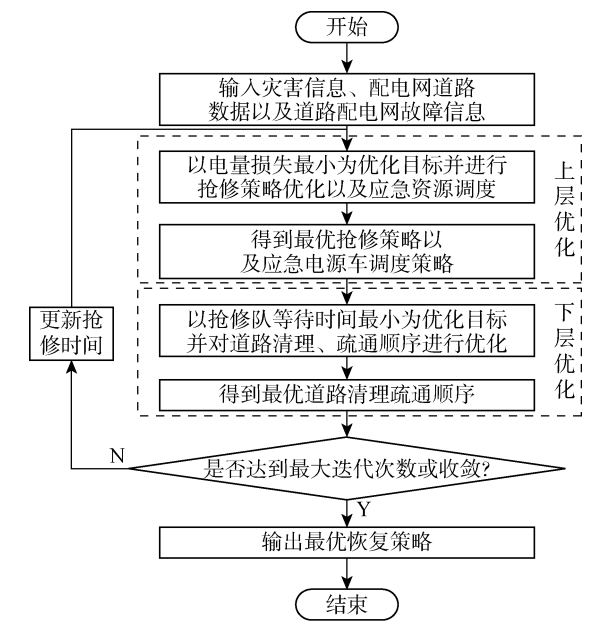


图 2 双层优化模型求解流程图
Fig. 2 Flow chart of solving two-layer optimization model

4 算例分析

4.1 交通-配电网耦合算例

采用 IEEE33 节点配电网^[6]与一个仅考虑城市主干道的 12 节点交通网^[31]相耦合的系统进行算例分析, 分别如图 3 与图 4 所示. 图中: R 和 # 分别表示交通网道路和配电网线路编号. 交通网和配电网

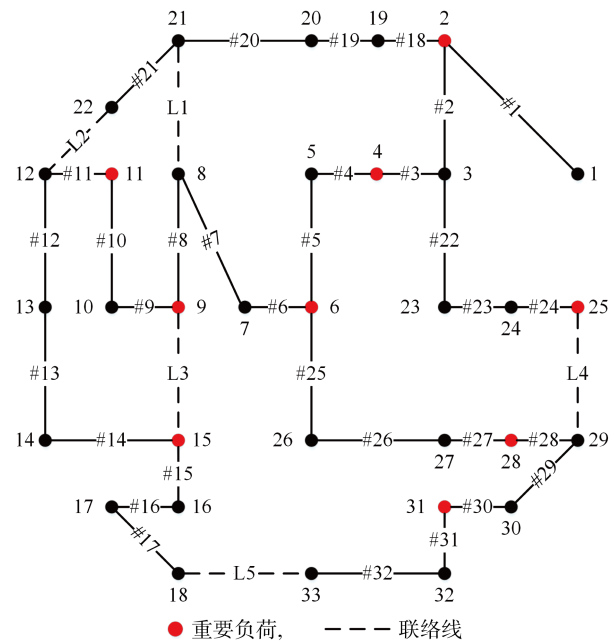


图 4 配电网 IEEE33 节点结构图
Fig. 4 IEEE 33-bus distribution network

空间耦合关系如附录表 2 所示.

4.2 地震灾害下交通-配电网故障场景分析

4.2.1 交通-配电网易损性分析

根据某西南地区地震相关数据统计结果, 对式(3)中的 θ 、式(4)中的 β 及式(6)中的 c_l 和 ζ 进行同步估计. 配电网电线杆和交通网单位长度道路段受损概率随地震强度、离震源中心距离的变化趋势如附录图 2 所示. 电线杆受损概率和道路受损概率均随地震等级的增大而增大, 随震中距的增大而减小, 其中受损道路状态表明, 在地震情况下, 道路轻微受损的概率最大, 完全毁坏的概率最小, 远小于 0.1. 在地震灾害下, 本文采用的交通-配电网耦合算例故障概率需满足上述规律.

4.2.2 交通-配电网故障概率分析

假设交通-配电网系统所在区域发生 6.5 级地震, 震源中心位于交通-配电网耦合系统左侧. 将交通-配电网系统划分为 8 个区域, 其中离震源中心距离最近为 5 km, 最远为 12 km, 具体划分范围如附录图 3 所示. 为简化计算, 对于跨区域的线路, 取其中点所在的区域作为计算故障概率的参考点. 因此, 该场景下配电网各线路、交通网各道路的故障概率分别如图 5 与图 6 所示.

由图 5 可知, 各线路所包括的电线杆数量以及位置存在差异, 导致各线路故障概率的差异较大. 其中, 该场景下线路段 #7、#8、#9、#12、#13、#14、#15、#16、#19 和 #21 的故障概率较高. 由图 6 可

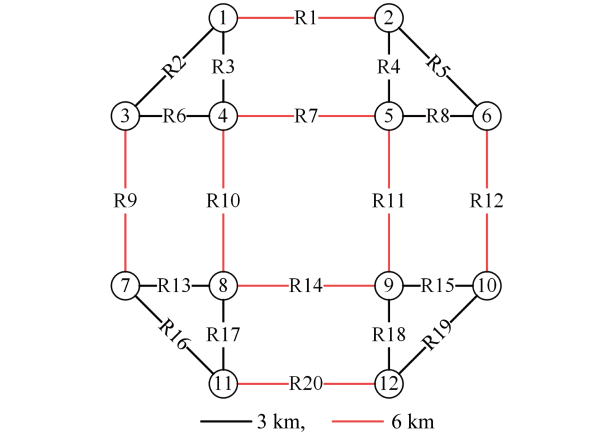


图 3 12 节点交通网结构图
Fig. 3 12-node transportation network

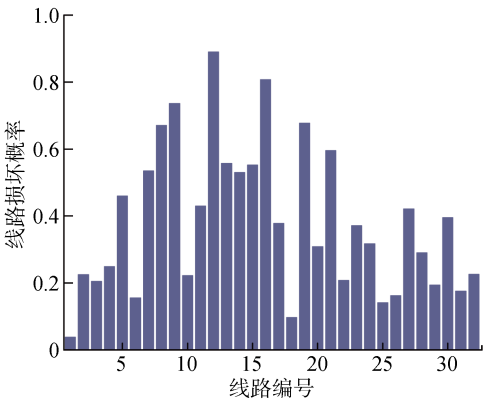


图 5 配电网线路故障概率

Fig. 5 Probability of distribution network line failure

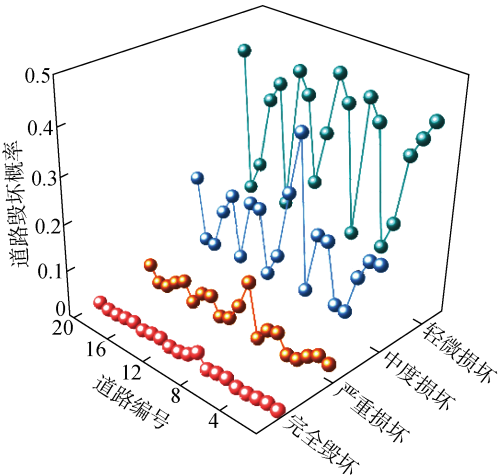


图 6 不同程度损伤的道路故障概率

Fig. 6 Road failure probability with different degrees of damage

知,大部分道路轻微受损、中度受损的概率较大,所有道路完全毁坏的概率皆小于 0.1。其中,由于道路 9 离震源中心的距离最近,为 5 km,所以其受损概率最大,为 0.920 3;严重受损的概率为 0.119 5。在该地震场景下,道路 R1、R2、R3、R6、R7、R9、R10、R13、R14、R16、R17 和 R20 的受损概率皆大于 50%。

4.2.3 故障场景的选取 地震灾害发生后,假设所有故障线路段均可以抢修成功,采用轮盘赌算法,创建配电网、交通网故障场景集。根据文献[17]中的系

统信息熵方法筛选发生概率最大的典型场景,其故障场景如附录图 4 所示;其中故障线路与道路的受损情况如附录表 3 所示。

假设抢修队于灾害发生 4 h 后开始进行抢修。抢修队初始位置位于节点 1 即交通网节点 6。该节点配置 1 个配电网抢修小队、1 个道路清理修复小队。抢修过程中地震灾区的天气适合抢修的进行,抢修车的行驶初始速度为 40 km/h。基于此研究制定地震灾害后的配电网恢复策略。

4.3 配电网韧性评估分析

为验证地震灾害下配电网韧性评估指标的合理性,考虑是否计及受损交通网进行对比分析。如图 7 所示,由于受损道路会阻碍配电网抢修队车辆正常行驶,导致系统恢复时间与重要负荷恢复时间较道路完全通畅情况下较长,不考虑道路受损情况会导致韧性评价结果过于乐观,所以本文所提韧性评估指标值低于不考虑受损交通网的韧性指标,两种韧性指标的差异如图中阴影部分所示。分别采用本文提出的韧性指标 R_n 、文献[32]中的韧性指标 R_c 和文献[33]中的韧性指标 R_r 进行评估。如表 1 所示,韧性指标 R_c 和 R_r 在受损交通网下的韧性指标值高于不考虑受损交通网的情况,不符合图 7 中两种韧性曲线的特征。然而韧性指标 R_n 值与韧性曲线相对应,表明本文提出的韧性评估指标更为准确。

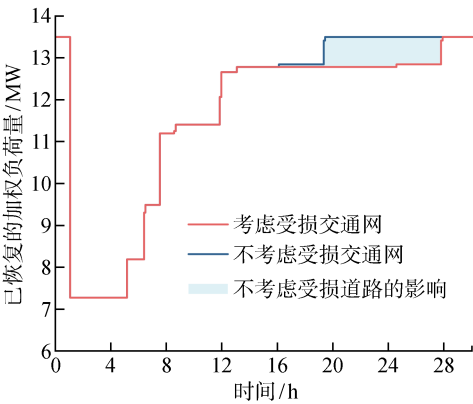


图 7 地震灾害下韧性评估指标合理性分析

Fig. 7 Rationality analysis of resilience evaluation indicators in earthquake disaster

表 1 不同的韧性指标比较

Tab. 1 Comparison of different resilience indicators

方案	$R_n/\%$	$R_r/\%$	$R_c/(\text{MW} \cdot \text{h})$	系统恢复时间/h	重要负荷恢复时间/h
不考虑受损交通网	79.28	79.28	51.410	14.363	14.263
考虑受损交通网	54.18	84.13	57.503	22.825	22.725

4.4 配电网韧性提升措施分析

为更快恢复灾后配电网重要负荷的正常供电,在抢修资源中增加应急电源车调度用于抢修过程.在配电网节点 1,即交通网节点 6 处配置两辆应急电源车,每辆应急电源车最大输出功率为 150 kW,满负荷状态下能持续供电 15 h.

在受损的交通网中,考虑两辆应急电源车灵活支援不同故障区域,同时采用双层优化模型确定配电网抢修顺序与交通网修复疏通顺序作为配电网韧性提升优化策略,其抢修及调度顺序均由贪心算法求取,如附录表 4 所示.考虑应急电源车与道路修复顺序对地震灾害下配电网多故障抢修的影响,在受损交通网中将不同策略中的道路修复顺序及应急电源车调度分别与所提策略进行对比,分析优化策略的优势.

对比策略 1:不考虑应急电源车,采用双层优化模型确定配电网抢修顺序与交通网修复疏通顺序恢复故障配电网.

对比策略 2:在策略 1 基础上,不考虑优化交通网修复疏通顺序.交通网修复疏通顺序根据修复难易程度,先修复中度受损道路、后修复严重受损道路.

对比策略 3:在策略 1 基础上,在恢复过程中考虑将两辆应急电源车,并将两辆应急电源车作为一个整体进行调度,为同一个停电区域供电.

对比策略 4:在策略 3 的基础上,考虑两辆应急电源车仅为配电网中失电量最大的停电区域持续供电.

5 种优化策略的配电网韧性曲线如图 8 所示.由于对比策略 2 未考虑优化受损交通网修复顺序,导致配电网抢修队等待时间过长,故障恢复速度慢,比其他策略长 4.5 h,其韧性值较低.本文优化策略

与对比策略 1、3、4 均考虑优化受损交通网修复顺序,虽然故障恢复的时间相同,但由于本文优化策略采用两辆应急电源车的灵活调度,相较于对比策略 1、3、4 能有效提高地震灾害下配电网韧性.

不同策略的韧性指标对比如表 2 所示.在不考虑应急电源车的情况下,对比策略 1 优化配电网抢修与交通网修复顺序,其韧性指标值为 63.14%,较对比策略 2 提升 9.29%.当应急电源车作为抢修资源进行抢修调度时,对比策略 3 接入应急电源车后,配电网韧性指标值提升至 65.03%.对比策略 4 采用应急电源车为失电量最大的停电区域持续供电,将其韧性指标值提升至 64.42%,仅较对比策略 1 提升 1.28%.本文优化策略考虑两台应急电源车的灵活调度,其韧性指标值提升效果最佳,较对比策略 1 提升 2.11%;由于应急电源车数量较少,所以相较于对比策略 3 的韧性值提升不大,但其重要负荷恢复时间远小于对比策略 3;同时,重要负荷恢复时长最短,表明本文优化策略更优.

因此,配电网抢修队和交通网修复队的协同恢复能有效提升配电网韧性.在此基础上,加入应急电源车为重要负荷供电能更好地提升配电网韧性.上述结果分析表明,合理的应急电源车调度方案能更大程度提升配电网韧性.

表 2 不同策略韧性指标比较

Tab. 2 Comparison of resilience indicators of different strategies

恢复策略	$R_n/\%$	系统缺失面积/(MW·h)	系统恢复时间/h	重要负荷恢复时间/h
对比策略 1	63.14	46.379	19.5	7.275
对比策略 2	53.85	50.024	24	8.775
对比策略 3	65.03	38.235	19.5	2.848
对比策略 4	64.42	42.042	19.5	6.125
本文优化策略	65.96	34.231	19.5	1.425

5 结论

考虑地震灾害攻击交通网的影响,提出地震灾害下配电网韧性评估指标以合理描述地震灾害下配电网韧性.构建协同故障线路抢修、道路修复疏通以及应急资源调度的双层优化模型,求解所得的恢复策略可为电力系统调度人员应对地震灾害提供较为完整可行的恢复方案,从而实现地震灾害下配电网韧性的提升.通过算例分析,可以得到以下结论:

(1) 考虑受地震攻击的受损道路对配电网抢修进程有较大影响,本文耦合交通网与配电网,协同故

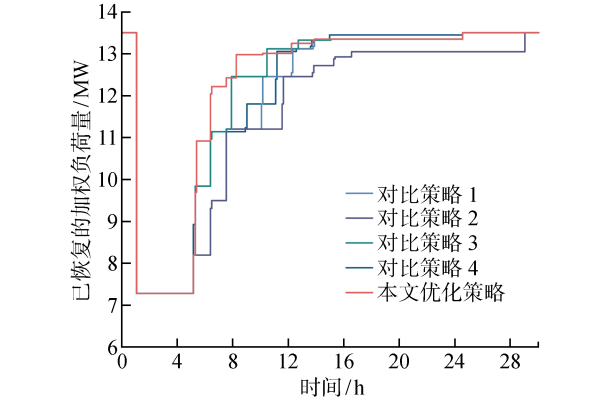


图 8 不同策略下韧性曲线图
Fig. 8 Resilience curves of different strategies

障线路抢修与受损道路修复,更符合现实情况,可为多部门联合应对地震灾害提供理论参考。

(2) 引入配电网抢修队等待道路修复疏通时间,结合配电网功能曲线缺失面积改进韧性评估指标,提出一种适用于地震灾害的韧性评估指标,进一步完善配电网韧性评估理论。

(3) 所提恢复策略可协同配电网故障线路抢修、交通网道路修复以及应急资源调度,有效提高地震灾害下配电网韧性。

综上所述,研究成果可以作为地震灾害下配电网故障抢修问题的基础性和前瞻性工作,为配电网地震灾害下韧性评估提供理论研究基础。由于本文对应急电源车的路径规划仅考虑无损道路和轻微受损道路,未来工作将把中度受损和严重受损道路纳入应急电源车调度路径的规划范围内,结合交通拥堵等交通网特征对配电网韧性评估指标进行改进,进一步研究应急电源车的调度成本及恢复策略的经济性。

附录见本刊网络版(xuebao.sjtu.edu.cn/article/2023/1006-2467-57-09-1165.shtml)

参考文献:

[1] 韩超,丁志锋,王越,等. 长历时强震对电力基础设施的致灾影响[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(6): 83-90.

HAN Chao, DING Zhifeng, WANG Yue, *et al.* Disaster characteristics of long duration ground motion and its effects on electric power facilities[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2018, 27(6): 83-90.

[2] 林旭川,刘雪艳,胡仁康,等. 鲁甸地震宏观震中建筑群震害分析与抗震韧性评估[J]. 地震研究, 2020, 43(3): 449-455.

LIN Xuchuan, LIU Xueyan, HU Renkang, *et al.* Regional damage analysis and resilience evaluation of buildings in the epicenter region of 2014 Ludian earthquake[J]. *Journal of Seismological Research*, 2020, 43(3): 449-455.

[3] 陈惠云,冯志泽,傅辉,等. 我国电力系统地震灾害损失基本特征分析[J]. 地震研究, 2019, 42(2): 179-186.

CHEN Huiyun, FENG Zhize, FU Hui, *et al.* Preliminary analysis of basic characteristics of earthquake disaster loss in China power system[J]. *Journal of Seismological Research*, 2019, 42(2): 179-186.

[4] 孙江玉,刘创,欧阳敏,等. 地震灾害下电网性能研究综述:以弹性视角为主[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(2): 14-23.

SUN Jiangyu, LIU Chuang, OUYANG Min, *et al.* Review of performance studies on electric power grids under seismic hazards—with a focus on resilience perspective[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2018, 27(2): 14-23.

[5] 罗伟,李长城,据上纯,等. 考虑孤岛融合的配电系统多源协同恢复策略[J]. 电网技术, 2022, 46(4): 1485-1495.

LUO Wei, LI Changcheng, JU Shangchun, *et al.* Multi-source cooperative restoration strategy for distribution system considering islanding integration[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(4): 1485-1495.

[6] 许寅,和敬涵,王颖,等. 韧性背景下的配网故障恢复研究综述及展望[J]. 电工技术学报, 2019, 34(16): 3416-3429.

XU Yin, HE Jinghan, WANG Ying, *et al.* A review on distribution system restoration for resilience enhancement[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(16): 3416-3429.

[7] 别朝红,林雁翎,邱爱慈. 弹性电网及其恢复力的基本概念与研究展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(22): 1-9.

BIE Zhaohong, LIN Yanling, QIU Aici. Concept and research prospects of power system resilience[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(22): 1-9.

[8] 阮前途,谢伟,许寅,等. 韧性电网的概念与关键特征[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(21): 6773-6784.

RUAN Qiantu, XIE Wei, XU Yin, *et al.* Concept and key features of resilient power grids[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(21): 6773-6784.

[9] 李振坤,王法顺,郭维一,等. 极端天气下智能配电网的弹性评估[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(9): 60-68.

LI Zhenkun, WANG Fashun, GUO Weiyi, *et al.* Resilience evaluation of smart distribution network in extreme weather[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(9): 60-68.

[10] YANG Y H, TANG W H, LIU Y, *et al.* Quantitative resilience assessment for power transmission systems under typhoon weather[J]. *IEEE Access*, 6: 40747-40756.

[11] 陈碧云,李翠珍,覃鸿,等. 考虑网架重构和灾区复电过程的配电网抗台风韧性评估[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(6): 47-52.

CHEN Biyun, LI Cuizhen, QIN Hong, *et al.* Evaluation of typhoon resilience of distribution network considering grid reconstruction and disaster recovery

- [J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2018, 42(6): 47-52.
- [12] 张海波, 马伸铜, 程鑫, 等. 保证重要负荷不间断供电的配电网储能规划方法[J]. **电网技术**, 2021, 45(1): 259-268.
ZHANG Haibo, MA Shentong, CHENG Xin, *et al.* Distribution network energy storage planning ensuring uninterrupted power supply for critical loads[J]. **Power System Technology**, 2021, 45(1): 259-268.
- [13] GHOLAMI A, SHEKARI T, AMIRIOUN M H, *et al.* Toward a consensus on the definition and taxonomy of power system resilience[J]. **IEEE Access**, 2018, 6: 32035-32053.
- [14] 李雪, 孙霆锴, 侯恺, 等. 地震灾害下海岛综合能源系统韧性评估方法研究[J]. **中国电机工程学报**, 2020, 40(17): 5476-5493.
LI Xue, SUN Tingkai, HOU Kai, *et al.* Evaluating resilience of island integrated energy systems with earthquake[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2020, 40(17): 5476-5493.
- [15] 李双琳. 山区配电网震后恢复及资源调度集成优化研究[J]. **中国管理科学**, 2020, 28(8): 148-161.
LI Shuanglin. Logistic support for post-earthquake mountain areas power distribution systems restoration[J]. **Chinese Journal of Management Science**, 2020, 28(8): 148-161.
- [16] 周士超, 刘晓林, 熊展, 等. 考虑韧性提升的交直流配电网线路加固和储能配置策略[J]. **上海交通大学学报**, 2021, 55(12): 1619-1630.
ZHOU Shichao, LIU Xiaolin, XIONG Zhan, *et al.* Line hardening and energy storage system configuration strategies for resilience enhancement of a hybrid AC-DC distribution system[J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2021, 55(12): 1619-1630.
- [17] 雷霞, 郑国鑫, 胡益. 地震灾害下配电网的脆弱性分析及弹性提升措施[J]. **电网技术**, 2021, 45(9): 3674-3680.
LEI Xia, ZHENG Guoxin, HU Yi. Vulnerability analysis and resilience improvement of distribution network under earthquake disasters[J]. **Power System Technology**, 2021, 45(9): 3674-3680.
- [18] 刘天浩, 朱元振, 孙润稼, 等. 极端自然灾害下电力信息物理系统韧性增强策略[J]. **电力系统自动化**, 2021, 45(3): 40-48.
LIU Tianhao, ZHU Yuanzhen, SUN Runjia, *et al.* Resilience-enhanced strategy for cyber-physical power system under extreme natural disasters[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2021, 45(3): 40-48.
- [19] 彭寒梅, 王小豪, 魏宁, 等. 提升配电网弹性的微网差异化恢复运行方法[J]. **电网技术**, 2019, 43(7): 2328-2335.
PENG Hanmei, WANG Xiaohao, WEI Ning, *et al.* Microgrid differentiated recovery operation for enhancing distribution system resilience[J]. **Power System Technology**, 2019, 43(7): 2328-2335.
- [20] FARZIN H, FOTUHI-FIRUZABAD M, MOEINI-AGHTAIE M. Enhancing power system resilience through hierarchical outage management in multi-microgrids[J]. **IEEE Transactions on Smart Grid**, 2016, 7(6): 2869-2879.
- [21] CHEN C, WANG J H, QIU F, *et al.* Resilient distribution system by microgrids formation after natural disasters[J]. **IEEE Transactions on Smart Grid**, 2016, 7(2): 958-966.
- [22] 葛少云, 张成昊, 刘洪, 等. 考虑微能源网支撑作用的配电网弹性提升策略[J]. **电网技术**, 2019, 43(7): 2306-2317.
GE Shaoyun, ZHANG Chenghao, LIU Hong, *et al.* Resilience enhancement strategy for distribution network considering supporting role of micro energy grid[J]. **Power System Technology**, 2019, 43(7): 2306-2317.
- [23] 王守相, 刘琪, 赵倩宇, 等. 配电网弹性内涵分析与研究展望[J]. **电力系统自动化**, 2021, 45(9): 1-9.
WANG Shouxiang, LIU Qi, ZHAO Qianyu, *et al.* Connotation analysis and prospect of distribution network elasticity[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2021, 45(9): 1-9.
- [24] 周晓敏, 葛少云, 李腾, 等. 极端天气条件下的配电网韧性分析方法及提升措施研究[J]. **中国电机工程学报**, 2018, 38(2): 505-513.
ZHOU Xiaomin, GE Shaoyun, LI Teng, *et al.* Assessing and boosting resilience of distribution system under extreme weather[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2018, 38(2): 505-513.
- [25] LEI S B, CHEN C, ZHOU H, *et al.* Routing and scheduling of mobile power sources for distribution system resilience enhancement[J]. **IEEE Transactions on Smart Grid**, 2019, 10(5): 5650-5662.
- [26] 杨丽君, 安立明, 杨博, 等. 基于可达性分析的主动配电网多故障分区修复策略[J]. **电工技术学报**, 2018, 33(20): 4864-4875.
YANG Lijun, AN Liming, YANG Bo, *et al.* Multi-fault partition repair strategy of active distribution network based on reachability analysis[J]. **Transactions of China Electrotechnical Society**, 2018, 33(20): 4864-4875.
- [27] 王守相, 王林, 王洪坤, 等. 地震灾害下提升恢复力

的配电网优化恢复策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(6): 28-35.

WANG Shouxiang, WANG Lin, WANG Hongkun, *et al.* Optimal recovery strategy for distribution network to improve its resilience under earthquake disasters[J]. **Proceedings of the CSU-EPSA**, 2020, 32(6): 28-35.

[28] 郁琛, 李尚轩, 谢云云, 等. 考虑交通网与配电网信息融合的台风后配电网抢修策略优化[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(4): 15-24.

YU Chen, LI Shangxuan, XIE Yunyun, *et al.* Optimization of post-typhoon rush repair strategy for distribution network considering information integration of traffic network and distribution network[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2022, 46(4): 15-24.

[29] 张振斌, 唐丽华. 新疆南天山地区土层场地地震动峰值加速度衰减关系[J]. 中国地震, 2010, 26(4): 401-406.

ZHANG Zhenbin, TANG Lihua. The attenuation relationship of peak ground motion acceleration on soil site at the south Tianshan region in Xinjiang[J]. **Earthquake Research in China**, 2010, 26(4): 401-406.

[30] 廖赓. 汶川地震公路路基震害调查分析及易损性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.

LIAO Yi. Analysis of seismic hazard survey and study on vulnerability of highway subgrade in Wenchuan earthquake[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.

[31] XU Y, WANG Y, HE J H, *et al.* Resilience-oriented distribution system restoration considering mobile emergency resource dispatch in transportation system[J]. **IEEE Access**, 2019, 7: 73899-73912.

[32] BRUNEAU M, REINHORN A. Exploring the concept of seismic resilience for acute care facilities[J]. **Earthquake Spectra**, 2007, 23(1): 41-62.

[33] MIN O Y, DUEÑAS-OSORIO L, XIN M. A three-stage resilience analysis framework for urban infrastructure systems[J]. **Structural Safety**, 2012, 36-37: 23-31.

(本文编辑:王历历)