

文章编号:1671-6833(2025)06-0084-09

考虑多类型极端天气的配电网多维韧性评估方法

王要强^{1,2}, 李午祥^{1,2}, 韩婧^{1,2}, 梁军^{1,3}, 袁嘉^{1,2}

(1. 郑州大学 电气与信息工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南省电力电子与电力系统工程技术研究中心, 河南 郑州 450001; 3. 卡迪夫大学 工程学院, 英国 卡迪夫 CF243AA)

摘要: 全球极端灾害频发, 极端天气事件严重威胁配电网安全运行。为提高配电网应对极端灾害的韧性, 提出了一种多类型极端天气模型及多维韧性评估方法。首先, 基于台风、暴雨及冰暴灾害影响机理, 构建统一的配电网元件故障率模型, 并利用蒙特卡洛采样与 K-means 聚类算法筛选典型故障场景; 其次, 提出基于综合权重法的多维韧性评估指标体系, 涵盖防御力、适应力和恢复力, 并构建多源协同优化的灾后恢复模型以验证所提韧性评估方法的有效性; 最后, 以 IEEE33 节点和 IEEE69 节点系统为例, 对比加固线路、分布式电源动态调度、提高移动电源容量 3 种措施。结果表明: 所提方法较传统主观赋权评估法得分提升 11.2%, 评估结果更加准确全面。

关键词: 配电网; 极端灾害; 韧性评估; 韧性指标; 灾后恢复; 指标权重

中图分类号: TM73; P429

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2025.03.024

近年来, 极端天气频发, 严重威胁人民生命财产安全, 并引发大规模停电事故, 造成巨大经济损失。如: 2008 年 5 月, 汶川大地震使得川西北电网瘫痪, 四川省全网瞬时损失负荷高达 31.8%^[1]; 2016 年 7 月, 17 级超强台风“尼伯特”袭击台湾, 造成 54 万余户电力中断^[2]; 2021 年 10 月, 受极端强降雨影响, 山西超 500 条 10 kV 及以上配电线路停运^[3]。根据统计数据^[4]表明, 由极端灾害引起的配电网大规模停电事故占比约为 50%, 可见极端灾害对电网造成的影响值得引起重视。

韧性定义为“系统预防、适应扰动并快速恢复的能力”, 重点在于系统从受扰动到恢复的动态过程。配电网作为电力系统末端, 易受极端灾害破坏, 分析其韧性及提升策略具有重要意义。目前, 在极端灾害影响机理、韧性指标及韧性评估方法等方面研究已取得一定进展, 但多维韧性指标体系、多类型极端灾害的交互影响需进一步研究。林杰欢^[5]研究了配电网在冰暴天气下的脆弱性及恢复力; 王振浩等^[6]基于 Batts 台风风场模型, 分析了暴雨对配电网元件故障的影响; 吴勇军等^[7]分析了暴雨的致灾

机理, 从滑坡、山洪等方面建立线路故障率模型。在现实中, 配电网常受到多种灾害的影响, 而现有研究多聚焦于单一灾害类型的评估, 忽略了多灾害情况下的韧性评估, 因此, 考虑多类型极端灾害影响的配电网韧性评估具有重要理论与现实意义。配电网韧性评估指标分为两个方面, 即元件的故障概率^[8]和电网性能^[9]。电力元件的故障率模型是韧性评估的基础, 根据故障率模型可以准确分析配电网故障情况, 并采取有效的韧性措施。Ma 等^[10]分析了风速对杆塔、树木以及洪水对地下电缆的影响, 构建了配电线路的时变失效概率函数; Ghosh 等^[11]考虑到不同风速对配电网杆塔、导线的影响, 得到各元件在任意风速下的脆弱性曲线。电网性能也可以从多方面评估, 王钰山等^[12]以台风灾害期间受灾配电网的累积切负荷损失值作为韧性指标; 雷霞等^[13]将配电网的供电能力作为系统性能指标, 通过采取提升措施前后系统性能曲线之间的差额面积来评估配电网的韧性能力; 李振坤等^[14]基于配电网防灾及减灾两阶段, 从配电网防御时间、弹性恢复系数和孤岛可持续时间覆盖率等方面评估了其韧性能力。由

收稿日期: 2025-02-09; 修订日期: 2025-03-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62203395); 中央引导地方科技发展资金项目(2022ZY0134)

作者简介: 王要强(1982—), 男, 河南郑州人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事新能源电力系统与装备、电力变换与系统控制及电力系统运行与规划等研究, E-mail: WangyqEE@163.com。

引用本文: 王要强, 李午祥, 韩婧, 等. 考虑多类型极端天气的配电网多维韧性评估方法[J]. 郑州大学学报(工学版), 2025, 46(6): 84-92. (WANG Y Q, LI W X, HAN J, et al. Multidimensional resilience assessment method for distribution networks considering multiple types of extreme weather[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2025, 46(6): 84-92.)

此可知,涵盖元件故障概率和电网性能的多维韧性指标体系能够全面评估配电网韧性,而各指标权重大小如何影响评估结果是需要进一步研究的问题。

为此,本文提出了一种多类型极端灾害影响下的配电网元件故障率模型及多维韧性评估方法(multi-dimensional resilience evaluation method, MREM)。首先,提取台风、暴雨及冰暴天气的特征参数,分析多种灾害耦合影响下配电网元件的荷载效应,建立统一的配电网元件故障率模型;其次,根据配电网遭受灾害的不同阶段,考虑指标权重在韧性评估中的作用,从防御力、适应力和恢复力 3 个维度构建韧性评估指标体系;最后,以 IEEE33 节点和 IEEE69 节点系统为例,采用负荷削减量最小为优化目标建立多源协同恢复模型,比较加固线路、分布式电源动态调度和提升移动电源容量 3 种措施的效果,验证了所提评估方法在多灾害场景下的有效性与优越性。

1 配电网韧性特征以及多类型极端灾害建模

1.1 配电网韧性特征

配电网在极端灾害下的系统功能曲线如图 1 所示,系统状态大致可分为 4 个阶段:[0, t₁) 正常运行阶段、[t₁, t₂) 灾害抵御阶段、[t₂, t₃) 降额运行阶段和 [t₃, t₆) 故障恢复阶段。

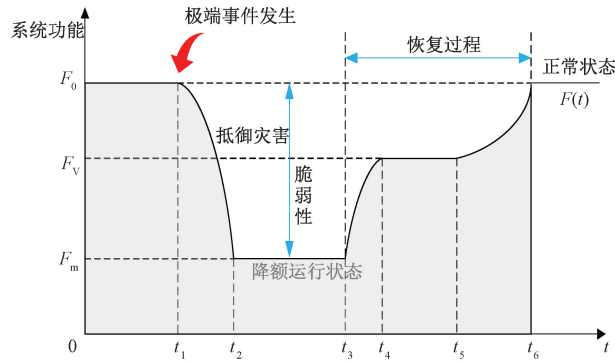


图 1 配电网在极端灾害下的系统功能曲线

Figure 1 System function curve of distribution network with extreme disaster

1.2 台风灾害下配电网元件荷载效应

为分析台风风速和风向对配电网杆塔、导线的影响,本文采用 Batts 风场模型,并考虑台风移动路径^[15]的变化。Batts 风场模型如下:

$$V = \begin{cases} V_{R_{\max}} \frac{r}{R_{\max}}, & r \leq R_{\max}; \\ V_{R_{\max}} \left(\frac{R_{\max}}{r} \right)^{0.7}, & r > R_{\max}. \end{cases} \quad (1)$$

式中:V 为任意位置处时变风速,风向为模拟圆上逆时针切向方向;r 为线路距台风中心的距离;R_{max} 为台风中心到最大风速处的距离即最大风速半径;V_{R_{max}} 为最大风速半径处的风速。

配电网导线单位风荷载与导线所受的风速及风向有关,导线水平方向作用力 N₁ 和垂直方向重力 N₂ 具体计算公式如下:

$$N_1 = 1.2 \frac{V^2}{1600} D_1 \sin^2 \beta. \quad (2)$$

式中:D₁ 为导线外径;β 为风向与线路的夹角。

$$N_2 = m_{\text{wire}} g. \quad (3)$$

式中:m_{wire} 为导线单位长度的质量;g 为重力加速度。

配电网导线在台风天气下的综合荷载为

$$N_0 = \sqrt{N_1^2 + N_2^2}; \quad (4)$$

$$F_1 = \sqrt{F_{1z}^2 + \frac{N^2 d_{\text{gv}}^2}{\cos^2 \alpha}}. \quad (5)$$

式中:F₁ 为导线悬挂点沿切线方向的综合荷载;F_{1z} 为导线弧垂最低点的张力;N₀ 为导线单位长度的综合张力;d_{gv} 为导线悬挂点到导线弧垂最低点的距离;α 为高度差角,即导线前后两悬挂点的连线与水平面的夹角。

配电网杆塔风荷载 M₁ 具体计算公式如下:

$$M_1 = h_1 O_1 \delta_{1b} \frac{V^2}{1.6} \cdot \frac{D_{11} + D_{12}}{2} + \sum_{k=1}^{n_{p,1}} F_{1k} \cdot I \cdot h_{1k}. \quad (6)$$

式中:h₁ 为杆塔高度;O₁ 为杆身风压合力作用点到杆根的距离;δ_{1b} 为杆塔体型系数;D₁₁、D₁₂ 分别为杆塔顶部直径与杆根直径;F_{1k} 为架空线 k 的风荷载;I 为档距;h_{1k} 为架空线 k 到杆塔底部的垂直距离;n_{p,1} 为杆塔所悬挂导线的根数。

对于架空线路而言,台风天气下树木倒塌造成的线路故障或断开也是停电的主要原因。树木倒塌造成的导线故障率^[16]计算公式如下:

$$\begin{cases} p_{\text{fir},k,i}(v(t)) = \frac{e^{-h(S_k)}}{1 + e^{-h(S_k)}}; \\ h(S_k) = a_s + c_s (k_s S_k) D_H^{b_s}. \end{cases} \quad (7)$$

式中:p_{fir,k,i}(v(t)) 表示树木倒塌影响导线 i 的故障概率;S_k 为导线 k 处的风强度(0~1 尺度);D_H 为树胸高处的直径;k_s 为考虑局部地形效应的因子;a_s、b_s 和 c_s 均为与树种相关的参数。

1.3 台风暴雨灾害下配电网元件荷载效应

台风登陆时常伴随暴雨天气,暴雨对配电网元件的影响也不容忽视。暴雨天气下配电网导线水平

F_{w_h} 与垂直 F_{w_v} 方向荷载^[17]暴雨影响导线的荷载、暴雨影响杆塔的荷载分别为

$$F_{w_h} = \int_0^{\infty} k_r \rho_w S(\gamma V_{\text{wire}}, R) n(D, R) \gamma^3 V^3 D^3 dD + \frac{\rho_a V^2}{2} C_D(V_{\text{wire}}, R) A; \quad (8)$$

$$F_{w_v} = \int_0^{\infty} k_r \rho_w S(V_{\text{term}}(D), R) n(D, R) V_{\text{term}}^3(D) D^3 dD; \quad (9)$$

$$F_{w_{\text{rain}}} = \sqrt{F_{w_h}^2 + F_{w_v}^2}; \quad (10)$$

$$F_{l_{\text{rain}}} = 2 \int_0^{\infty} k_r \rho_w S(\gamma V_{\text{wire}}, R) n(D, R) \gamma^3 V_{\text{wire}}^3 D^3 dD. \quad (11)$$

式中: ρ_w 为雨水密度; R 为降雨强度; ρ_a 为空气密度; A 为配电杆塔迎风面积; D 为雨滴直径; V 为线路承受的风速; $C_D(V_{\text{wire}}, R)$ 为导线在台风暴雨耦合影响下的阻力系数; $n(D, R)$ 为雨滴大小分布; k_r 为预定义的常量; $S(\gamma V_{\text{wire}}, R)$ 和 $S(V_{\text{term}}(D), R)$ 分别为水平和垂直方向下的雨滴冲击力归一化曲线面积; $V_{\text{term}}(D)$ 表示直径为 D 的雨滴的垂直终端速度; γ 为雨滴水平速度与相应风速之比。

1.4 冰暴灾害下配电网元件荷载效应

以配电网某线路 i 单位长度导线在坐标系的位置 (x_i, y_i) 为例, 可得到该位置处导线的覆冰荷载为

$$L_{\text{ice}}(x_i, y_i) = A_{\text{rate}} e^{\left[-\frac{1}{2} \left(\left(\frac{x_i - x_E}{\sigma_x} \right)^2 + \left(\frac{y_i - y_E}{\sigma_y} \right)^2 \right) \right]}. \quad (12)$$

式中: L_{ice} 为导线覆冰荷载; (x_E, y_E) 表示随时间变化的灾害中心点坐标; A_{rate} 表示覆冰增长率; σ_x 、 σ_y 分别表示导线在 x 轴和 y 轴上的荷载参数, 取值与灾害影响半径相关。

杆塔覆冰荷载^[20]如下式所示:

$$G_{\text{ice}} = G_v \left[\frac{l_1 + l_2}{2} + \left(\frac{F_1 h_1}{G_v l_1} + \frac{F_2 h_2}{G_v l_2} \right) \right]. \quad (13)$$

式中: G_{ice} 为杆塔覆冰荷载; $G_v = 0.0277 L_{\text{ice}} (L_{\text{ice}} + D_1)$ 为导线单位垂直荷载; l_1 、 l_2 分别为杆塔两侧档距; F_1 、 F_2 分别为杆塔两侧水平张力; h_1 、 h_2 分别为杆塔两侧悬挂点的高度差, 比邻塔高为正, 反之则为负。

1.5 多类型极端灾害下配电网元件故障率模型

多类型灾害下导线综合应力为

$$\begin{cases} N = \sqrt{N_0^2 + F_{w_{\text{rain}}}^2 + L_{\text{ice}}^2}; \\ \sigma_g = \frac{F_l}{S_l}. \end{cases} \quad (14)$$

式中: S_l 为导线截面积。

多类型灾害下杆塔综合弯矩为

$$M_T = \sqrt{M_i^2 + F_{l_{\text{rain}}}^2 + G_{\text{ice}}^2}. \quad (15)$$

架空线路杆塔及导线的故障率均服从正态分布^[9], 线路正常运行的条件是导线与杆塔均不故障, 故考虑多类型极端灾害的影响下的架空线路综合故障率计算公式如下:

$$P_i(t) = 1 - \left[\prod_{k=1}^{m_1} (1 - p_{mw,k,i}(t)) \cdot \prod_{c=1}^{m_2} (1 - p_{ft,c,i}(t)) \right]. \quad (16)$$

式中: $P_i(t)$ 为架空线路 i 的时变故障率; m_1 为线路 i 的导线数; m_2 为线路 i 的杆塔数; $p_{mw,k,i}$ 表示线路 i 的第 k 段导线的时变故障率; $p_{ft,c,i}$ 表示线路 i 的第 c 个杆塔的时变故障率。

2 配电网韧性评估指标与评估方法

2.1 韧性指标计算

2.1.1 防御力

配电网防御力指标包括配电网加权负荷缺失面积 R_1 、加权负荷损失速率 S_{los} 。 R_1 定义如下:

$$R_1 = \sum_{u=1}^U \omega_u \cdot Im_u = \sum_{u=1}^U \omega_u \cdot E \left[\frac{\int_0^{T_0} L(t) dt}{\int_0^{T_0} NL(t) dt} \right] =$$

$$\sum_{u=1}^U \omega_u \cdot E \left[\frac{\int_0^{T_0} NL(t) dt - RES_u}{\int_0^{T_0} NL(t) dt} \right]. \quad (17)$$

式中: ω_u 为场景 u 的发生概率; U 为故障场景数; Im_u 表示场景 u 的供电缺失量; $T_0 = t_3 - t_1$ 表示配电网受极端天气影响的时间; $L(t)$ 表示极端天气下配电网的实际负荷曲线; $NL(t)$ 表示系统正常运行时的目标负荷曲线; RES_u 表示负荷曲线的缺失面积。

S_{los} 定义如下:

$$S_{\text{los}} = \frac{\int_0^{T_1} [NL(t) - L(t)] dt}{t_2 - t_1}. \quad (18)$$

式中: $T_1 = t_2 - t_1$ 表示配网从正常运行状态过渡到降额运行状态的时间。

2.1.2 适应力

极端灾害可导致配电网停电, 配电网通过优化联络开关、柴油发电机和柔性负荷调度, 保持降额稳定运行。本文提出用重要负荷支撑率 R_2 和系统平均停电时间 $SAIDI_T$ 作为评估配电网适应灾害韧性的指标^[19], 具体定义如下:

$$R_2 = \frac{\int_0^{T_2} L_s(t) dt}{\int_0^{T_2} NL_s(t) dt} \quad (19)$$

式中: $T_2 = t_3 - t_2$ 表示处于降额稳定运行的时间; $L_s(t)$ 表示极端灾害发生期间配电网实际的重要负荷曲线; $NL_s(t)$ 表示配电网正常运行时的重要负荷曲线。

$$SAIDI_T = \frac{\sum_{j \in \Omega_N} U_{T_j} N_j}{\sum_{j \in \Omega_N} N_j} \quad (20)$$

式中: U_{T_j} 为极端天气导致的负荷点停运时间; N_j 为负荷节点 j 的用户数。

2.1.3 恢复力

恢复力指标反映配电网灾后恢复能力,包括恢复速率 S_{re} 、恢复水平 F_{ad} 。

S_{re} 反映了配电网在灾后恢复期间单位时间的负荷恢复量,可衡量系统性能恢复的快慢。

$$S_{re} = \frac{\int_0^{T_3} [NL_{re}(t) - L(t)] dt}{t_6 - t_3} \quad (21)$$

式中: $NL_{re}(t)$ 表示灾害恢复后配电系统的实际负荷曲线。

F_{ad} 表示系统经过恢复措施所能达到的运行稳定状态比例,即

$$F_{ad} = \frac{F_r}{F_0} \quad (22)$$

式中: F_r 表示配电网采取恢复措施后的负荷水平; F_0 表示未遭受极端灾害的配电网原始负荷水平。

2.2 韧性指标体系赋权

本文采用综合权重法,结合防御力、适应力及恢复力指标,以极端天气下配电网韧性评估为目标层,从灾前、灾中及灾后三阶段考虑配电网的韧性特征,建立如图 2 所示的极端天气下配电网韧性能力评估体系。该体系通过定性与定量分析,得到韧性指标的主观权重,然后计算指标数据本身的信息熵,根据熵权对指标权重修正后得到其客观权重。

根据韧性指标的主、客观权重计算指标综合权重 W_b ,计算公式如下:

$$W_b = \frac{\alpha_b \beta_b}{\sum_{b=1}^n (\alpha_b \beta_b)} \quad (23)$$

式中: α_b 、 β_b 分别为主观、客观权重,其中主观权重根据比例标度表由专家打分计算得到,客观权重由配电网运行数据分析计算得到; n 为韧性指标的个数。

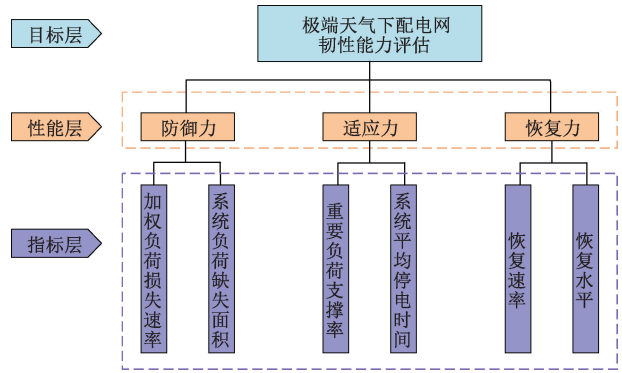


图 2 韧性能力评估体系

Figure 2 Resilience capacity assessment system

2.3 多源协同优化的灾后恢复模型

2.3.1 目标函数

优先恢复重要负荷供电的同时,最大程度减少配电网负荷功率削减,目标函数如式(24)所示。

$$\min \sum_{t \in \Omega_T} \sum_{j \in \Omega_N} w_j P_{j,t}^{Lshd} \quad (24)$$

式中: w_j 表示节点 j 的削负荷成本,根据负荷不同重要程度设置不同的削负荷成本; Ω_T 为故障时段的集合; Ω_N 为配电网节点集合; $P_{j,t}^{Lshd}$ 为 t 时刻节点 j 处的负荷有功削减功率。

2.3.2 约束条件

约束条件包括配电网辐射拓扑约束、负荷削减约束、分布式电源出力约束、配电网运行约束、EV 及 MESS 的时空动态调度约束和充放电约束、电动汽车充放电约束,具体公式见文献[20]。

3 算例分析

本文采用 IEEE33 系统和更大规模的 IEEE69 节点配电系统算例,验证所提评估方法的有效性。建立的灾后多源协同恢复问题为混合整数二阶锥规划模型,可通过 MATLAB R2021a 软件调用商业求解器 Gurobi 求解。使用的仿真环境为 Intel i5-8300 H(2.30 GHz),内存 8 GB。

3.1 算例设置

本文针对 IEEE33 和 IEEE69 节点配电系统建立了直角坐标系,分别以节点 1 和线路 L_1 为原点和 x 轴正方向,以垂直 L_1 向上为 y 轴正方向,线路长度与角度参照文献[21]。线路采用 LGJ-240/30 架空线,档距 50 m,杆塔为 G 级混凝土电杆,承受最大弯矩 48.76 kN/m,线路抗拉强度均值和标准差分别为 184.75 N/mm² 和 21.26 N/mm²。假设两个节点间配电线路被档距分开的不同线段所受的荷载均等于该线路中心处的荷载,该线路的不同杆塔所受荷载由线路中心处杆塔荷载决定。配网区域位于纬度

118°58'N~119°2'N 和经度 28°14'E~28°22'E 之间。

本文以 2023 年某地区台风、暴雨灾害为例,结合历年冰暴灾害数据,台风登陆位置为(70.6 km, -25.91 km),登陆参数为[1.57 rad, 16 km/h, 7.536×10^3 Pa],暴雨及冰暴灾害起始位置为(58.6 km, -8.41 km),初始移动速度为 10 km/h,影响范围半径为 8 km。灾害开始时刻为 00:00,即第 0 h,持续时间为 14 h,灾害开始时刻为仿真起始时刻。

3.2 多维指标体系与单指标的韧性评估分析

为验证多维韧性评估体系的有效性,基于 IEEE33 节点系统,采用多维韧性指标与单一指标进行评估。通过蒙特卡洛法生成 1 000 个灾害场景,并利用 K-means 算法(聚类数为 5)筛选出 5 个代表性故障场景,灾后负荷恢复曲线见图 3。

选取重要负荷支撑率和梯形面积作为对比指标,与本文提出的 MREM 方法进行对比,评估结果映

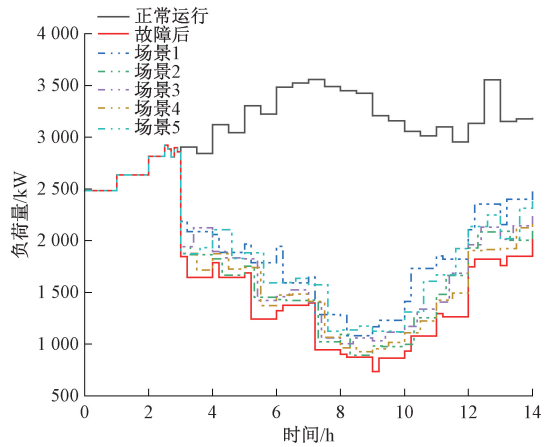


图 3 极端灾害下配电网供电恢复负荷曲线

Figure 3 Load recovery curve of distribution network with extreme disaster

射至 $[0, 100]$ ^[22],结果如表 1 所示。其中,MREM 韧性指标综合权重分别为 $\psi_1 = 0.2517, \psi_2 = 0.1153, \psi_3 = 0.0872, \psi_4 = 0.1337, \psi_5 = 0.2196, \psi_6 = 0.1925$ 。

表 1 聚类后故障场景的韧性评估结果分析

Table 1 Analysis of toughness evaluation results of fault scenarios after clustering

场景	R_1	S_{los}	R_2	$SAIDI_T$	S_{re}	F_{ad}	梯形面积	重要负荷支撑率	R_{MREM}
场景 1	0.437	0.331	0.918	0.326	0.351	0.479	52.4	91.8	60.0
场景 2	0.538	0.335	0.896	0.338	0.314	0.397	49.5	89.6	54.7
场景 3	0.537	0.333	0.906	0.334	0.237	0.431	50.3	90.6	55.1
场景 4	0.619	0.425	0.922	0.345	0.228	0.388	47.2	92.2	48.1
场景 5	0.439	0.379	0.791	0.332	0.336	0.404	51.7	79.1	58.4

由表 1 可知,传统梯形面积法与 MREM 方法在总体趋势上基本一致。以场景 4 为例,尽管 6 个指标较差,两者得分均为最低,但重要负荷支撑率评分却高于场景 1;而场景 1 的 6 个指标表现较好,3 种方法得分均为最高。这表明重要负荷支撑率在评估中存在片面性。

此外,场景 2 和场景 3 的分析表明,梯形面积法与重要负荷支撑率得分接近,区分度较低;而 MREM 方法考虑了负荷损失速率与恢复力,能够有效区分两者差异。

3.3 韧性指标权重对配电网韧性评估的影响

本文采用传统主观赋权法作为 IEEE33 节点的韧性评估对比方法,基于上述计算结果和评估指标体系,两种方法的评估结果如表 2 所示。

由表 2 可知,场景 3 的综合赋权 R_{MREM} 评分高于场景 2,而传统主观赋权 R_{MREM} 评分评估结果则相反。这是因为场景 3 在 R_1 和 F_{ad} 指标上表现更好,尽管场景 2 的 S_{los} 和 $SAIDI_T$ 指标较高,但其权重较小,因此场景 3 的综合韧性更强。

此外,表 1 数据显示,场景 1 的 R_1 最小且权重

表 2 MREM 指标的赋权评分结果

Table 2 Empowerment scores of MREM indicators

场景序号	综合赋权 R_{MREM} 评分	传统主观赋权 R_{MREM} 评分
场景 1	60.0	56.7
场景 2	54.7	49.2
场景 3	55.1	48.5
场景 4	48.1	47.4
场景 5	58.4	53.2

最大,指标表现最好;而场景 5 尽管负荷损失较大,但 R_{MREM} 综合得分高于场景 2,3,4。与主观赋权法相比,综合权重法的评估结果更科学、准确。

3.4 不同场景下配电网韧性评估分析

3.4.1 加固线路对配电网韧性的影响

更换高强度架空线和杆塔可有效降低线路在极端灾害中的故障率。本文以 IEEE33 和 IEEE69 节点系统为算例,采用 I 级杆塔(抗弯力矩 58.5 kN·m)与 LGJ 240/55 架空线(抗拉强度均值 195.35 N/mm²,标准差 29.52 N/mm²)替换部分线路。

以线路 4 和线路 13 为例,通过对以下 4 种韧性

提升措施的对比来验证评估方法的有效性,结果如 表 3 所示。

表 3 更换线路元件对配电网韧性的影响

Table 3 Impact of replacing line components on the resilience of distribution networks

系统	韧性措施	R_1	S_{los}	R_2	$SAIDI_T$	S_{re}	F_{ad}	R_{MREM}
IEEE33 节点	措施 1	0.503	0.224	0.843	0.239	0.354	0.241	59.1
	措施 2	0.481	0.203	0.849	0.237	0.359	0.244	59.9
	措施 3	0.471	0.182	0.854	0.233	0.363	0.248	60.2
	措施 4	0.455	0.167	0.863	0.231	0.366	0.253	60.7
IEEE69 节点	措施 1	0.569	0.276	0.860	0.275	0.386	0.248	54.9
	措施 2	0.549	0.252	0.871	0.268	0.392	0.252	55.7
	措施 3	0.532	0.237	0.877	0.262	0.396	0.255	56.3
	措施 4	0.516	0.217	0.883	0.242	0.401	0.257	57.0

措施 1:G 级杆塔和 LGJ 240/30 架空线;措施 2:I 级杆塔和 LGJ 240/30 架空线;措施 3:G 级杆塔和 LGJ 240/55 架空线;措施 4:I 级杆塔和 LGJ 240/55 架空线。

由表 3 中韧性指标的变化可知,提升杆塔或导线强度有效增强配电网的韧性,采用高抗拉强度的架空线比采用高抗弯强度的杆塔,韧性提升效果更明显。此外,对比措施 4 下两个配电系统韧性提升效果发现,IEEE69 系统的抵御力提升程度较 IEEE33 系统高 6.7%, R_{MREM} 提升程度较 IEEE33 系统高 31.3%,表明评估方法对大规模配电网依然具有良好的适用性。

3.4.2 分布式电源参与调度对配电网韧性水平的影响

以 4 种故障场景为例,对比不同措施下的负荷恢复情况并计算 R_{MREM} ,对 IEEE33 节点和 IEEE69 节点配电网进行韧性评估。在该场景下,IEEE33 节点系统线路 3,7,28,35 发生故障,IEEE69 节点系统线路 12,27,46,60 发生故障。

基于以下 3 种情形,IEEE33 节点与 IEEE69 节点系统的故障恢复过程如图 4 和图 5 所示,采用本文所提 MREM 的韧性评估结果见表 4 所示。

情形 1 为含移动储能与柴油发电机的动态调度,不含 EV 调度;情形 2 为含 EV、移动储能与柴油发电机的动态调度;情形 3 为接入光伏、EV、移动储能与柴油发电机的动态恢复调度。

从表 4 可以看出,对 IEEE33 节点配电网而言,相比于情形 1,情形 2 的 R_1 减少 16.1%, S_{los} 仅降低 2.5%, R_2 提高 8.7%, F_{ad} 仅提高 4.5%,配电网综合韧性值 R_{MREM} 提高 14%;情形 3 接入光伏后,系统能够恢复更多负荷供电,且负荷波动幅度变小,配电网综合韧性值 R_{MREM} 较情形 2 提高 24%。对于规模更大的 IEEE69 节点系统而言,与情形 1 相比,情形 2

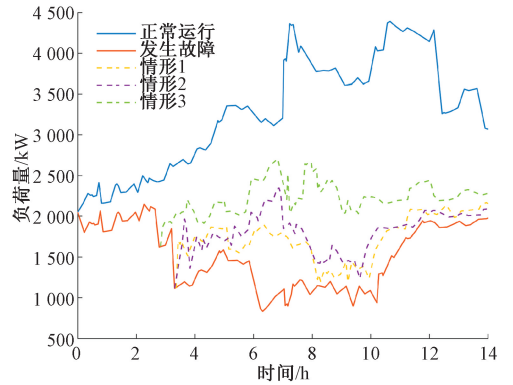


图 4 不同分布式电源对 IEEE33 配电网负荷恢复的影响
Figure 4 The impact of different distributed power sources on load recovery of IEEE33 distribution network

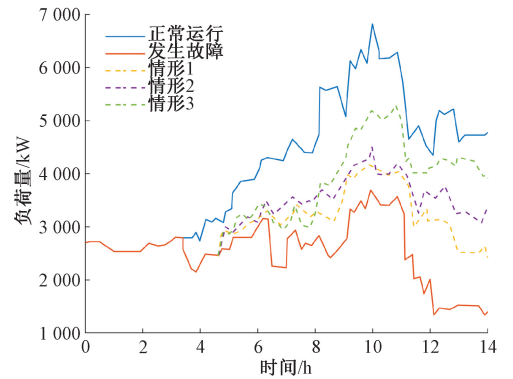


图 5 不同分布式电源对 IEEE69 配电网负荷恢复的影响
Figure 5 The impact of different distributed power sources on load recovery of IEEE69 distribution network

的 R_1 减少 10.7%, S_{los} 降低 20%, R_2 提高 11.9%, F_{ad} 提高 5.7%,配电网综合韧性值 R_{MREM} 提高 8%;由于 IEEE69 配电网接入更多的光伏,情形 3 的 R_{MREM} 较情形 2 提高 46%,系统韧性提升更加显著。

此外,对比图 4 的供电负荷曲线可知,第 3.2 h 时,EV 参与负荷恢复,但受灾后交通网络拥堵影响,负荷恢复略有延迟;第 5.5 h 时,EV 到达负荷节点并处于放电状态;7~10 h 时段 EV 处于充电状

表4 不同分布式电源参与调度的配电网韧性评估结果

Table 4 Resilience assessment results of distribution networks with different distributed power sources participating in scheduling

系统	不同情形	R_1	S_{los}	R_2	$SAIDI_T$	S_{re}	F_{ad}	R_{MREM}
IEEE33 系统	情形 1	0.546	0.242	0.853	0.236	0.328	0.529	52.8
	情形 2	0.458	0.236	0.927	0.275	0.354	0.553	54.2
	情形 3	0.327	0.216	0.934	0.229	0.409	0.577	56.6
IEEE69 系统	情形 1	0.514	0.284	0.784	0.276	0.272	0.457	56.8
	情形 2	0.459	0.227	0.877	0.245	0.292	0.483	57.6
	情形 3	0.335	0.188	0.924	0.224	0.312	0.521	60.2

态;9~11 h 时段 EV 参与负荷供电。情形 2 的负荷水平高于情形 1,同时受 EV 接入容量的限制,负荷恢复效果有待进一步提高,而情形 3 接入光伏后,更多负荷得到恢复。

图 5 表明,IEEE69 节点系统故障后负荷波动较大,4.2 h 接入 EV 和移动电源后负荷有所提升,但情形 2 提升幅度有限。同样情况下,接入光伏不仅负荷恢复更高,且有效平抑了波动。

3.4.3 移动电源可供容量对配电网韧性的影响

通过研究 MESS 和 EV 作为移动电源恢复配电网故障节点的效果,提高电源容量,分析其对 IEEE33 节点配电网韧性的影响,并验证评估方法的有效性,设置表 5 的 3 种情形进行分析。

表 5 不同容量 MESS 及 EV 的配置情景

Table 5 Configuration scenarios of MESS and EV with different capacities

不同情形	MESS 额定容量/ (kW·h)	EV 额定容量/ (kW·h)
情形 1	200	20
情形 2	300	30
情形 3	400	40

3 种不同情形的恢复结果见图 6;韧性评估结果如表 6 所示。

在图 6 中,对比情形 1 和情形 2 可知,随着移动

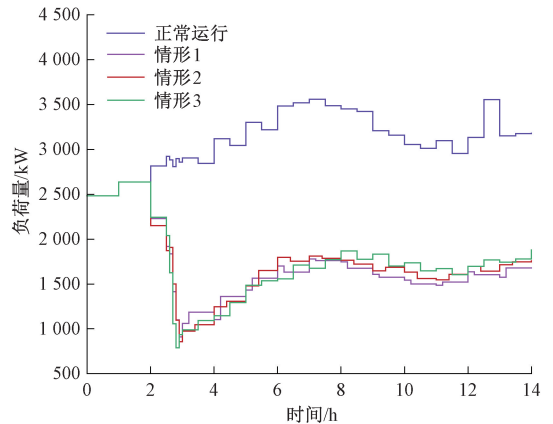


图 6 提高移动电源可供容量对配电网负荷恢复的影响
Figure 6 Influence of increasing available capacity of mobile power on load recovery of distribution network

电源容量增加,重要负荷支撑率、恢复速率和恢复水平提高,系统平均停电时间减少,配电网韧性增强;而加权负荷损失速率保持不变,因为该指标仅与灾害强度、电网元件和线路类型相关,受移动电源容量影响较小。

在图 6 中,比较情形 2 和情形 3 的负荷恢复情况,随着移动电源容量的增加,重要负荷支撑率和恢复水平几乎不再提高,综合指标体系因涵盖加权负荷缺失面积和系统平均停电时间,评估范围更广,能够更全面反映配电网不同维度的韧性特征。

表 6 提高移动电源可供容量后配电网韧性评估结果

Table 6 Distribution network resilience assessment results after increasing the available capacity of mobile power

不同情形	R_1	S_{los}	R_2	$SAIDI_T$	S_{re}	F_{ad}	R_{MREM}
情形 1	0.476	0.259	0.807	0.274	0.361	0.490	55.2
情形 2	0.464	0.261	0.869	0.270	0.396	0.511	57.8
情形 3	0.455	0.257	0.871	0.262	0.445	0.514	58.1

4 结论

为全面评估极端灾害下配电网的韧性水平,本文提出了多类型极端天气下配电网元件故障率模型及多维韧性评估方法,得出以下结论。

(1) 本文考虑台风、暴雨及冰暴天气参数对配电网元件故障率的影响,提出一种统一的配电网元件故障率模型,通过算例验证了模型的有效性,进而为韧性提升措施提供科学指导。

(2) 在配电网韧性评估中,基于防御力、适应力

和恢复力3个维度,采用综合权重法进行评估,比传统梯形面积和重要负荷支撑率评估方法更加全面、准确。

(3)韧性评估结果表明,加固线路、移动电源动态调度及提高移动电源容量均能有效提升配电网韧性,所提评估方法适用于不同场景、规模的配电系统。

参考文献:

- [1] 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 J Y, LIU C, OUYANG M, 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.
- [2] 李天友.配电网防灾减灾综述[J].供用电,2016,33(9):2-5.
LI T Y. A review of disaster prevention and mitigation in distribution network [J]. Distribution & Utilization, 2016,33(9):2-5.
- [3] 梁振锋,闫俊杰,李江锋,等.极端暴雨灾害下城市配电网风险评估方法[J].电网技术,2023,47(10):4180-4190.
LIANG Z F, YAN J J, LI J F, et al. Risk assessment of urban distribution network under extreme rainstorm disasters [J]. Power System Technology, 2023, 47(10):4180-4190.
- [4] WANG Y Z, CHEN C, WANG J H, et al. Research on resilience of power systems under natural disasters: a review[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2):1604-1613.
- [5] 林杰欢.强台风条件下配电网可靠性评估建模与预警框架研究[D].广州:广东工业大学,2019.
LIN J H. Research on reliability evaluation modeling and early warning framework of distribution network under strong typhoon conditions [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2019.
- [6] 王振浩,罗剑潇,成龙,等.面向台风天气下主动配电网韧性提升的改进分级减载策略[J].电力系统保护与控制,2023,51(22):34-48.
WANG Z H, LUO J X, CHENG L, et al. Improved graded load reduction strategy for resilience enhancement of an active distribution network in a typhoon [J]. Power System Protection and Control, 2023,51(22):34-48.
- [7] 吴勇军,薛禹胜,谢云云,等.台风及暴雨对电网故障率的时空影响[J].电力系统自动化,2016,40(2):20-29,83.
WU Y J, XUE Y S, XIE Y Y, et al. Space-time impact of typhoon and rainstorm on power grid fault probability [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(2):20-29,83.
- [8] 周晓敏,葛少云,李腾,等.极端天气条件下的配电网韧性分析及提升措施研究[J].中国电机工程学报,2018,38(2):505-513,681.
ZHOU X M, GE S Y, LI T, et al. Assessing and boosting resilience of distribution system under extreme weather [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2):505-513,681.
- [9] PANTELI M, MANCARELLA P, WILKINSON S, et al. Assessment of the resilience of transmission networks to extreme wind events [C]//2015 IEEE Eindhoven PowerTech. Piscataway: IEEE, 2015:1-6.
- [10] MA S S, CHEN B K, WANG Z Y. Resilience enhancement strategy for distribution systems under extreme weather events [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2):1442-1451.
- [11] GHOSH P, DEM L. Probabilistic quantification of distribution system resilience for an extreme event [J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2022, 2022:3838695.
- [12] 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 Y S, DENG H, WANG X, 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.
- [13] 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 X, ZHENG G X, HU Y. Vulnerability analysis and resilience improvement of distribution network under earthquake disasters [J]. Power System Technology, 2021, 45(9):3674-3680.
- [14] 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 Z K, WANG F S, GUO W Y, et al. Resilience evaluation of smart distribution network in extreme weather [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(9):60-68.
- [15] 郭明鑫,李少岩,顾雪平.计及台风灾害全过程模拟的配电网差异化加固规划韧性提升方法[J].电力系统保护与控制,2024,52(3):62-73.
GUO M X, LI S Y, GU X P. Differentiated reinforcement planning method for a distribution network considering simulation of the whole process of typhoon disasters [J].

- Power System Protection and Control, 2024, 52(3): 62-73.
- [16] CANHAM C D, PAPAIAK M J, LATTY E F. Interspecific variation in susceptibility to windthrow as a function of tree size and storm severity for northern temperate tree species[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2001, 31(1): 1-10.
- [17] FU X, LI H N, LI G, et al. Fragility analysis of a transmission tower under combined wind and rain loads[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020, 199: 104098.
- [18] 王守相, 黄仁山, 潘志新, 等. 极端冰雪天气下配电网弹性恢复力指标的构建及评估方法[J]. 高电压技术, 2020, 46(1): 123-132.
- WANG S X, HUANG R S, PAN Z X, et al. Construction and evaluation of resilience restoration capability indices for distribution network under extreme ice and snow weather[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 123-132.
- [19] 陈根永, 高翔宇, 谭超, 等. 集中式馈线自动化配电网供电可靠性评估[J]. 郑州大学学报(工学版), 2024, 45(1): 114-121.
- CHEN G Y, GAO X Y, TAN C, et al. Evaluation of power supply reliability of centralized feeder automation distribution network[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2024, 45(1): 114-121.
- [20] 王月汉, 刘文霞, 姚齐, 等. 面向配电网韧性提升的移动储能预布局与动态调度策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(15): 37-45.
- WANG Y H, LIU W X, YAO Q, et al. Pre-layout and dynamic scheduling strategy of mobile energy storage for resilience enhancement of distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(15): 37-45.
- [21] 李牧水. 考虑台风对线路荷载可靠度影响的架空线路加固规划[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- LI M S. Strengthening planning of overhead lines considering the influence of typhoon on line load reliability[D]. Chongqing: Chongqing University, 2020.
- [22] 符杨, 顾吉平, 田书欣, 等. 基于地震灾害场景的主动配电网多维韧性评估方法[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(3): 1-11.
- FU Y, GU J P, TIAN S X, et al. Multidimensional resilience evaluation method of active distribution network based on earthquake disaster scene[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(3): 1-11.

Multi-dimensional Resilience Assessment Method for Distribution Networks Considering Multiple-Types of Extreme Weather

WANG Yaoqiang^{1,2}, LI Wuxiang^{1,2}, HAN Jing^{1,2}, LIANG Jun^{1,3}, YUAN Jia^{1,2}

(1. School of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan Engineering Research Center of Power Electronics and Energy Systems, Zhengzhou 450001, China; 3. School of Engineering, Cardiff University, Cardiff CF243AA, UK)

Abstract: Extreme disasters occur frequently around the world, and extreme weather events seriously threaten the safe operation of distribution networks. In order to improve the resilience of distribution network to extreme disasters, a multi-type extreme weather model and a multi-dimensional resilience assessment method were proposed in this study. Firstly, based on the impact mechanism of typhoons, heavy rains and ice storms, a unified distribution network component failure rate model was constructed, and Monte Carlo sampling and K -means clustering algorithms were used to screen typical fault scenarios. Secondly, based on a comprehensive weight method a multi-dimensional resilience assessment index system was used to cover defense, adaptability and resilience, and a multi-source collaborative optimization disaster the post-recovery model was built to verify the effectiveness of the proposed resilience assessment method. Finally, taking the IEEE33 node and IEEE69 node systems as examples, the three measures of reinforcing lines, dynamic dispatching of distributed power sources, and increasing mobile power capacity were compared. The results showed that the proposed method was effective. Compared with the traditional one the score of the proposed method increased by 11.2%, and the evaluation results were more accurate and comprehensive.

Keywords: distribution network; extreme disasters; resilience assessment; resilience indicators; post-disaster recovery; index weight