

引用格式:侯祖锋,王超,徐春华,等.考虑负荷重要程度的配电网韧性提升策略及评估方法[J].电力科学与技术学报,2024,39(3):78-85.

Citation:HOU Zufeng,WANG Chao,XU Chunhua,et al.Promotion strategy and evaluation method of distribution network resilience considering load importance[J].Journal of Electric Power Science and Technology,2024,39(3):78-85.

# 考虑负荷重要程度的配电网韧性提升策略 及评估方法

侯祖锋<sup>1</sup>,王超<sup>1</sup>,徐春华<sup>1</sup>,林敏洪<sup>1</sup>,陈建钿<sup>1</sup>,丘冠新<sup>1</sup>,蒋国鑫<sup>2</sup>,廖凯<sup>2</sup>

(1.广东电网有限责任公司珠海供电局,广东珠海 519000;2.西南交通大学电气工程学院,四川成都 610031)

**摘要:**提出一种在极端天气灾害下考虑负荷重要程度的配电网韧性提升策略及评估方法,用于完善在小概率、高风险的极端天气灾害发生后的配电网韧性提升策略及评估体系。首先,以台风作为极端天气灾害代表事件,根据台风模型和架空线路故障概率模型确定线路故障概率;其次,建立三阶段韧性提升联合优化策略模型,根据线路故障概率确定韧性提升联合优化策略、故障线路以及最小切负荷率;然后,提出考虑负荷重要程度的电网韧性评估方法,根据韧性提升策略下各节点切负荷率和负荷重要程度来评估配电网韧性;最后,通过 IEEE 33 节点系统进行仿真,对比单种韧性提升措施与多种措施联合优化的韧性提升效果,验证所提韧性提升策略及评估方法的有效性与优越性。

**关键词:**配电网;韧性提升;韧性评估;极端天气;负荷重要程度

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2024.03.009 中图分类号:TM732 文章编号:1673-9140(2024)03-0078-08

## Promotion strategy and evaluation method of distribution network resilience considering load importance

HOU Zufeng<sup>1</sup>, WANG Chao<sup>1</sup>, XU Chunhua<sup>1</sup>, LIN Minhong<sup>1</sup>, CHEN Jiandian<sup>1</sup>,  
QIU Guanxin<sup>1</sup>, JIANG Guoxin<sup>2</sup>, LIAO Kai<sup>2</sup>

(1. Zhuhai Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Zhuhai 519000, China; 2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** A strategy and evaluation method for enhancing the resilience of distribution networks, which considers load importance under extreme weather disasters, is proposed to improve the resilience enhancement strategy and evaluation system of distribution networks after the occurrence of small-probability, high-risk extreme weather disasters. Firstly, taking typhoon weather as a representative event of extreme weather disasters, the line failure probability is determined based on the typhoon weather model and the failure probability model of overhead lines. Secondly, a three-stage joint optimization strategy model for resilience enhancement is established to determine the joint optimization strategy for resilience enhancement, the faulty lines, and the minimum load shedding rate based on the line failure probability. Then, a resilience evaluation method considering load importance is proposed to assess the resilience of distribution networks based on the load shedding rate and load importance of each node under the resilience enhancement strategy. Finally, simulations are conducted using the IEEE 33-node system to compare the resilience enhancement effects of single resilience enhancement measure with those of joint optimization of multiple measures, verifying the effectiveness and superiority of the proposed resilience enhancement strategy and evaluation method.

**Key words:** distribution network; resilience promotion; resilience assessment; extreme weather; load importance

收稿日期:2021-09-25;修回日期:2021-12-27

基金项目:南方电网公司科技项目(030400KK52190115(GDKJXM20198145))

通信作者:廖凯(1989—),男,博士,副教授,主要从事电力系统分析、稳定和控制等研究;E-mail:liaokai\_lk@hotmail.com

近年来,由各类小概率、高风险的极端天气灾害导致的电力系统停运事件给电网带来了巨大的经济损失<sup>[1-7]</sup>。配电网处于电网的末端,作为直接面对用户的关键环节,其应对极端天气灾害的能力,对保障人们生产生活、抵御灾害事故具有重要意义。因此,配电网引入韧性的概念以评估配电网对极端天气灾害的反应能力,即在极端天气灾害下减少故障造成的负荷损失并尽快恢复正常供电的能力<sup>[8]</sup>。同时,为了抵御极端天气带来的严重影响,亟须研究配电网韧性提升策略以缩小大规模停电范围,减少极端天气灾害下配电网故障造成的损失。

目前,关于配电网韧性提升已有一定的研究。文献[9]基于不同台风强度和负荷水平,研究了线路加固、双回路建设、缩短故障修复时间对配电网韧性提升的效果。文献[10]通过建立三阶段优化模型,选择配电网韧性提升效果最好的加固线路位置和加固策略。文献[11]考虑冰雪灾害背景下,通过电网分级保护和装设融冰设备来减少冰雪灾害的影响,实现电网的动态保护和韧性提升。文献[12]通过接入分布式电源(distributed generation, DG)为部分重要负荷供电,研究具有高度不确定性的含DG配电网的灾害应对能力。但上述研究没有综合考虑多种措施联合优化的韧性提升策略对配电网韧性提升的效果。

此外,极端天气下的配电网韧性评估主要从以下2个方面进行研究。①从极端天气对配电网影响角度。文献[13]根据台风等气象条件与电网故障之间的时空分布特性进行分析和建模。文献[14]基于各种自然灾害的随机攻击资源和由某种自然灾害引起的线路中断的随机概率分布的固有特性进行建模,建立一种基于多灾害场景的分布式鲁棒规划模型。②对韧性评估方法进行研究。文献[15]提出利用系统功能曲线缺失面积的大小或灾害过程中配电网调控运行成本来反映韧性。文献[16]提出一种基于最优潮流和序贯蒙特卡罗模拟的概率性多时相和多区域恢复能力评估方法。文献[17]从对目标系统的干扰影响的角度考虑极端事件的特征,提出一个综合考虑系统性能和中断特性的指标(RIDC)。然而,上述研究中的韧性评估缺少对配电网故障区域内损失负荷的重要程度的考虑,评估结果与实际情况有一定的出入。

综上所述,目前韧性提升策略及评估方法存在

不足,未考虑多种韧性提升措施联合优化以及评估指标未考虑负荷重要程度。本文从极端天气灾害中,选取台风天气为研究对象,分析台风天气下配电网故障概率模型;提出综合考虑加固线路、联络开关闭合方案和配置DG的韧性提升联合优化策略;根据配电网受灾后的韧性状态曲线,提出考虑负荷重要程度和系统性能的韧性评估指标。最后,通过IEEE 33节点系统进行仿真,利用所提韧性评估指标反映单种韧性提升措施和不同措施联合优化的韧性提升效果。

## 1 极端天气灾害下配电网故障概率模型

以台风天气作为极端天气灾害的代表事件,通过分析其对配电网线路故障的影响,搭建台风天气下的配电网线路故障概率模型。

### 1.1 台风天气模型

台风天气对配电网线路故障概率的影响可通过台风的风速和发生时间来量化。台风风速( $v(t)$ )的样本通过Gumbel概率分布(也称为极值I型概率分布)的累积分布函数(cumulative distribution function, CDF)进行逆变换得到,极值概率分布是基于历史数据模拟未来极端事件发生可能性的模型<sup>[18]</sup>。台风天气事件的发生时间(1~24 h)由 $T_s = U(1, 24)$ 表示, $U(1, 24)$ 表示1~24 h均匀分布的随机数。Gumbel概率分布表示如下:

$$F(x, \mu, \beta) = e^{-e^{-(x-\mu)/\beta}} \quad (1)$$

式中, $x$ 为风速变量; $\mu$ 、 $\beta$ 分别为Gumbel分布的位置和比例参数。

### 1.2 配电网线路故障概率模型

当台风天气事件发生时,配电网线路的杆塔和线路是否发生故障取决于台风天气的风速和杆塔与线路的故障概率。杆塔在台风天气下的故障概率曲线如图1所示,可以将杆塔的故障概率映射到台风风速,并用风速的对数正态CDF<sup>[19]</sup>表示:

$$\lambda(v(t)) = \Phi\left[\frac{\ln(v(t)/m_R)}{\delta_R}\right] \quad (2)$$

式中, $\lambda(v(t))$ 为杆塔故障率; $\Phi$ 为对数正态CDF; $v(t)$ 为台风风速; $m_R$ 为阻尼系数; $\delta_R$ 为强度测量的对数标准偏差。

配电线路中任何杆塔或导线发生故障都将致使整条线路断开,因此可以将配电网线路故障模型等效为一个串联模型<sup>[20]</sup>。假设配电网线路内不同

杆塔的故障概率是独立的,则架空线路的故障概率<sup>[18]</sup>可以表示为

$$f_{i,j}(v(t)) = 1 - \prod_{h=1}^m (1 - \lambda_h(v(t))) \quad (3)$$

式中, $f_{i,j}(v(t))$ 为架空线路 $ij$ 的故障概率; $m$ 为架空线路 $ij$ 中的杆塔数量; $\lambda_h(v(t))$ 为架空线路 $ij$ 中的第 $h$ 个杆塔的故障概率。

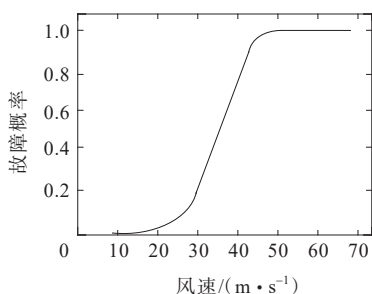


图1 杆塔的故障概率与风速关系曲线

Figure 1 Relationship curve between tower failure probability and wind speed

## 2 考虑负荷重要程度和多种措施联合优化的配电网韧性提升策略

本文综合考虑杆塔加固、优化联络开关方案和配置DG联合优化的配电网韧性提升策略,建立了一个三阶段韧性提升联合优化策略模型。其目的是在最小投资成本下,通过最小切负荷来提升电网韧性。三阶段韧性提升联合优化策略模型如图2所示,第一阶段模型确定加固位置和加固策略、联络开关闭合方案和DG的选址定容以及输出功率;第二阶段模型通过第一阶段模型确定的提升策略求得线路故障概率,再采用统一随机数判断台风天气下发生故障的架空线路;第三阶段模型在考虑负荷重要程度的情况下,以故障线路引起的最小化切负荷成本为目标进行优化。

三阶段模型目标函数可表示为

$$\min \left\{ L_1(y) + \min_{o \in O(y)} L_2(x) \right\} \quad (4)$$

1) 第一阶段模型确定最小的投资成本,其中 $L_1(y)$ 表示线路加固、联络开关闭合和配置DG的成本,可表示为

$$L_1(y) = \sum_{n,ij} c^k y_{ij}^k + \sum_l c^l S^l + \sum_{n,d} c^{DG} P_n^{DG}, \quad (5)$$

$$\forall (i,j) \in \Omega_B, k \in \Omega_x, l \in \Omega_L, n \in \Omega_N, d \in \Omega_{DG}$$

式中, $c^k$ 为采取加固策略类型所需的成本; $c^l$ 为第 $l$ 个联络开关动作的成本; $c^{DG}$ 为安装DG的成本; $y_{ij}^k$ 、

$S^l$ 属于二进制变量,分别表示线路 $ij$ 是否采取加固策略以及策略类型、第 $l$ 个联络开关是否闭合; $P_n^{DG}$ 为DG输出的有功功率; $ij, \Omega_B$ 分别表示当前线路和配电网线路集; $k, \Omega_x$ 分别表示线路加固策略类型和加固策略集; $l, \Omega_L$ 分别表示当前的联络开关和联络开关集; $n, \Omega_N$ 分别表示当前节点和配电网节点集; $d, \Omega_{DG}$ 分别表示当前DG类别和DG类别集。

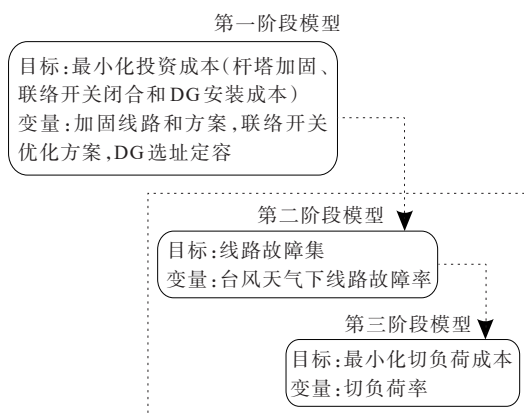


图2 配电网韧性提升策略的三阶段模型

Figure 2 Three-stage model for promotion strategy of distribution network resilience

韧性提升策略成本约束如下:

$$L_1(y) \leq B_1 \quad (6)$$

式中, $B_1$ 为预算的投资成本。

架空线路采用加固策略时,每条线路最多执行一种加固策略,表示为

$$Y = \begin{cases} y \sum_{k \in \Omega_x} y_{ij}^k = 1, \forall (i,j) \in \Omega_B, k \in \Omega_x \\ y_{ij}^k \in \{0, 1\} \end{cases} \quad (7)$$

DG的输出功率约束如下:

$$0 \leq P_n^{DG} \leq P_n^{DG, \max}, n \in \Omega_N, d \in \Omega_{DG} \quad (8)$$

$$0 \leq Q_n^{DG} \leq Q_n^{DG, \max}, n \in \Omega_N, d \in \Omega_{DG} \quad (9)$$

式(8)、(9)中, $P_n^{DG, \max}$ 、 $Q_n^{DG, \max}$ 分别表示DG有功、无功功率的限值。

2) 第二阶段模型确定配电网的故障线路,架空线路的故障状态通过统一的随机数进行判断。将生成的随机数与架空线路段的故障概率进行比较,在式(10)中判断架空线路 $ij$ 在台风天气中采取第 $k$ 种加固策略后是否发生故障( $r_{ij}^k$ )。在故障线路开始修复之前,收集有关故障线路信息,并将故障区域与网络其他部分进行隔离。假设故障线路隔离和恢复过程呈指数分布,则线路故障时间( $T_R$ )如下:

$$O = \left\{ \begin{array}{l} o|r_{ij}^k = \begin{cases} 1, & x_{\text{ine}} (= U(0, 1)) \leq f_{i,j}^k(v(t)) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \\ \forall (i, j) \in \Omega_B, k \in \Omega_y \end{array} \right\} \quad (10)$$

$$\begin{cases} T_R = -\ln(1 - x_i) \\ x_i = U(0, 1) \end{cases} \quad (11)$$

式(10)中, $O$ 为线路故障模型。 $f_{i,j}^k$ 为在采取第 $k$ 种加固策略后线路 $ij$ 的故障概率,可通过式(2)、(3)计算得到; $x_i$ 为一个均匀分布的随机数。

$$r_{ij}^k \leq y_{ij}^k, \forall (i, j) \in \Omega_B, k \in \Omega_y \quad (12)$$

$$\sum r_{ij}^k \leq 1, \forall (i, j) \in \Omega_B, k \in \Omega_y \quad (13)$$

式(12)表示线路 $ij$ 只有在采取第 $k$ 种加固策略后才能使得 $r_{ij}^k=1$ ;式(13)表示在台风天气事件中配电网线路 $ij$ 最多发生一次故障。

3) 第三阶段模型确定最小的切负荷成本, $L_2(x)$ 为考虑负荷重要程度的基础上进行最小切负荷的成本。

$$L_2(x) = \sum_n \mu_n c^L \rho_n P_n^L, n \in \Omega_N \quad (14)$$

式中, $\mu_n$ 为负荷 $n$ 的权重值,一级、二级、三级负荷权重分别为1.0、0.5、0.2; $c^L$ 、 $\rho_n$ 、 $P_n^L$ 分别表示切负荷成本、第 $n$ 个节点的切负荷率和负荷需求量。

故障发生后配电网运行需要满足的约束条件包括:节点的功率平衡约束、线路的潮流约束及网络连通性、节点电压约束和切负荷率限制。

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{\{j(i,j) \in \Omega_n\}} P_{ij} = \sum_{\{j(i,j) \in \Omega_n\}} P_{ji} - P_n^{\text{DG}} + (1 - \rho_n) P_n^L \\ \sum_{\{j(i,j) \in \Omega_n\}} Q_{ij} = \sum_{\{j(i,j) \in \Omega_n\}} Q_{ji} - Q_n^{\text{DG}} + (1 - \rho_n) Q_n^L \\ 0 \leq P_{ij} \leq (1 - r_{ij}) P_{ij}^{\text{max}}, \forall (i, j) \in \Omega_B \\ 0 \leq Q_{ij} \leq (1 - r_{ij}) Q_{ij}^{\text{max}}, \forall (i, j) \in \Omega_B \\ |V_j| \leq |V_i| - \frac{R_{ij} P_{ij} + X_{ij} Q_{ij}}{V_0} + r_{ij} M, \forall (i, j) \in \Omega_B \\ |V_i| - \frac{R_{ij} P_{ij} + X_{ij} Q_{ij}}{V_0} - r_{ij} M \leq |V_j|, \forall (i, j) \in \Omega_B \\ |V_i|^{\text{min}} \leq |V_i| \leq |V_i|^{\text{max}}, \forall i \in \Omega_N \\ 0 \leq \rho_n \leq 1, n \in \Omega_N \end{cases} \quad (15)$$

式中, $P_{ij}$ 、 $Q_{ij}$ 分别为线路 $ij$ 的有功、无功潮流; $P_n^{\text{DG}}$ 、 $Q_n^{\text{DG}}$ 分别为DG输出的有功、无功功率; $P_n^L$ 、 $Q_n^L$ 分别为第 $n$ 个节点的负荷有功、无功需求量; $r_{ij}$ 表示线路 $ij$ 是否断开,取1表示断开,取0表示未断开; $R_{ij}$ 、 $X_{ij}$

分别为线路 $ij$ 的电阻和电抗; $M$ 表示一个足够大的数; $P_{ij}^{\text{max}}$ 、 $Q_{ij}^{\text{max}}$ 分别为线路 $ij$ 的有功、无功限值; $V_0$ 、 $V_i$ 分别为初始电压和其余各个节点 $i$ 的节点电压; $|V_i|^{\text{min}}$ 、 $|V_i|^{\text{max}}$ 分别表示节点 $i$ 的电压上、下限。

### 3 考虑负荷重要程度的配电网韧性评估方法

配电网韧性评估应在考虑系统运行状态的基础上,有针对性地衡量系统供电的实际需求。因此,以韧性提升策略为基础,通过故障发生后配电网的负荷重要程度以及切负荷量与总负荷量的比值来进行配电网韧性评估,将配电网的负荷重要程度纳入韧性评估指标。

#### 3.1 考虑负荷重要程度的配电网韧性评估指标

如图3所示的台风天气下电网系统的韧性曲线展示了极端事件发生后系统性能的趋势<sup>[21]</sup>。 $T_0$ 为台风天气影响电网的开始时刻; $T_1$ 为系统开始发生降额的时刻; $T_2$ 、 $T_3$ 分别为电网降额运行的始末时刻; $T_4$ 为台风天气对电网影响的结束时刻; $T_5$ 为电网修复到原正常状态的时刻; $L_R(t)$ 代表台风天气期间电网的真实运行曲线; $L_I(t)$ 代表没有任何恶化影响的电网的理想性能曲线。

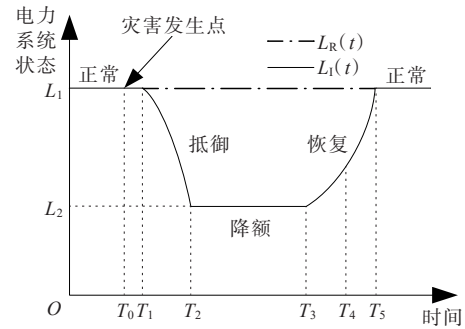


图3 台风天气下配电网的韧性状态曲线

Figure 3 Resilience state curve of distribution network in typhoon weather

现有韧性评估通常选择量化为从 $T_1$ 到 $T_5$ 期间曲线 $L_I(t)$ 与时间轴之间的面积与曲线 $L_R(t)$ 与时间轴之间的面积之比<sup>[22]</sup>:

$$R_r = \frac{\int_{T_1}^{T_5} L_R(t) dt}{\int_{T_1}^{T_5} L_I(t) dt} \quad (16)$$

在极端事件发生后,应该优先保障重要负荷供电,以便更好地应对和处理社会生产生活秩序,并且不同重要程度的负荷发生故障所产生的后果严重程度不同,然而评估指标 $R_r$ 未考虑这种情况。因

此,式(17)对式(16)进行了改进,提出一种考虑负荷重要程度的电网韧性评估指标( $R_A$ ),通过考虑负荷的重要程度与负荷损失来评估极端事件造成的影响,即根据负荷重要程度给出不同的权重值再乘以负荷实际运行状态与理想状态的比值。

$$R_A = \sum_{n=1}^N \left[ \mu_n \cdot \frac{\int_{T_0}^{T_1} (1 - \rho_n) L_{ln}(t) dt}{\int_{T_0}^{T_1} L_{ln}(t) dt} \right] \quad (17)$$

式中, $n$ 、 $N$ 分别为当前负荷和总的负荷集合; $\mu_n$ 为负荷 $n$ 的权重值; $\rho_n$ 为第 $n$ 个节点的切负荷率; $L_{ln}(t)$ 表示节点负荷 $n$ 的理想运行状态曲线。

### 3.2 配电网韧性评估流程

图4为配电网韧性评估流程图,配电网韧性评估流程包含以下步骤。

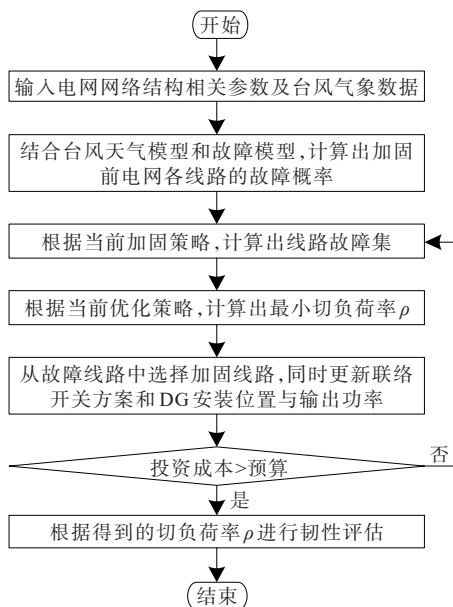


图4 配电网韧性评估流程

Figure 4 Flowchart of resilience assessment of distribution network

1) 输入配电网网络相关参数及台风气象数据,结合台风天气模型和线路故障模型,运用式(1)~(3)计算出加固前各架空线路的故障概率。

2) 基于当前加固策略,运用式(10)~(13)计算出线路故障集。

3) 基于当前优化策略中的加固线路方案、联络开关闭合方案和DG的安装位置和输出功率,运用式(15)计算出电网的最小切负荷率 $\rho$ 。

4) 更新韧性提升的优化策略,从当前线路故障集中选择一条负荷重要程度最高的故障线路进行加固,同时更新联络开关方案和DG安装位置与输出功率。

5) 根据最新优化策略判断投资成本是否超过

预算。如果是,则根据最新切负荷率 $\rho$ 结合式(17)来计算韧性指标 $R_A$ ,并结束程序;如果不是,则返回步骤2)。

## 4 算例分析

本文通过IEEE 33节点系统对台风天气下配电网韧性提升策略及评估方法进行算例验证,算例中线路杆塔平均杆距为50 m,配置3个燃气轮机分布式电源,其具体安装位置由文2中韧性提升策略的三阶段模型求解得出。假设整个系统位于单一的天气区域,所有的杆塔和线路共享相同的故障概率曲线。

测试系统的额定电压为12.66 kV,电压上、下限分别为0.95和1.05,投资成本假定为190 000元,联络开关价格为6 500/组,切负荷成本系数 $c^L$ 设置为50元/(kW·h)。式(1)中Gumbel分布的参数 $\mu$ 和 $\beta$ 分别取35和8。指数分布的线路故障平均时间( $T_R$ )为5 h。表1为杆塔的加固策略以及相应的故障概率参数和加固成本,表2为DG的具体参数。测试系统各节点负荷等级和极端事件发生前各节点负荷需求如图5所示。

表1 杆塔的加固策略

加固策略	$\ln(m_R)$	$\delta_R$	加固成本/元
未加固	4.76	0.137	0
策略1	5.06	0.134	1 600/杆塔
策略2	5.12	0.128	3 200/杆塔

表2 DG配置

DG	安装成本/ (元·(MW·h) <sup>-1</sup> )	安装容量/ MW	功率因数
1	180	0.18	0.8
2	150	0.15	0.8
3	100	0.10	0.8

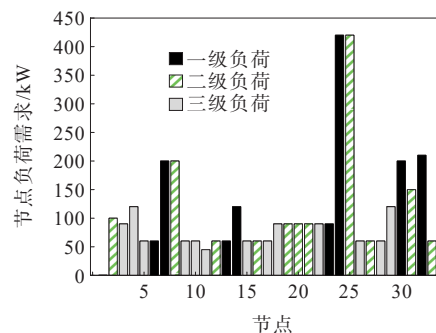


图5 极端事件发生前各节点负荷需求和负荷等级  
Figure 5 Load demand and load grade of each node before extreme events

通过本文模型分析整个配电网系统未采取任何韧性提升措施的情况,求解出台风天气会导致配电网线路 L<sub>7</sub>、L<sub>10</sub>、L<sub>14</sub>、L<sub>19</sub>、L<sub>22</sub>、L<sub>28</sub>、L<sub>32</sub> 发生故障,故障规模达到 7 重。配电网的故障情况如图 6 所示,其中虚线、虚线框分别表示故障线路和配电网失电区域,故障导致的切负荷量、切负荷成本分别为 14 075 kW·h 和 356 400 元。

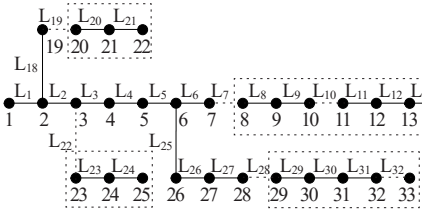


图 6 配电网的故障情况

Figure 6 Fault conditions of distribution network

### 4.1 联合优化韧性提升策略的验证

为研究多种措施联合优化韧性提升策略对配电网韧性的影响,从线路加固、优化联络开关闭合方案和配置 DG 3 种韧性提升措施出发,将它们组成多个联合优化韧性提升策略进行仿真分析。

场景 1:仅考虑线路加固策略。

场景 2:综合考虑线路加固和优化联络开关闭合方案的联合优化策略。

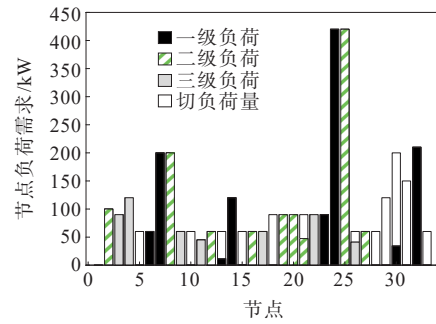
场景 3:综合考虑线路加固和配置 DG 的联合优化策略。

场景 4:综合考虑线路加固、优化联络开关闭合方案和配置 DG 的联合优化策略。

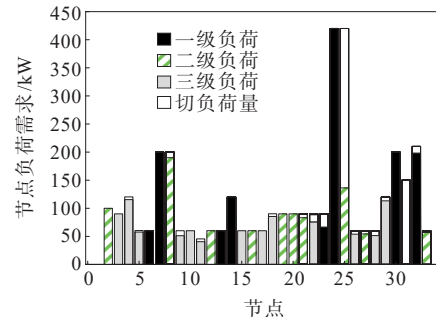
利用本文所提的优化策略模型求解出加固线路为 L<sub>7</sub>、L<sub>10</sub>、L<sub>19</sub>、L<sub>22</sub>,得到 DG<sub>1</sub>、DG<sub>2</sub>、DG<sub>3</sub> 的安装位置分别为节点 15、25、32。采取 4 种联合优化策略后各节点切负荷量情况如图 7 所示,各节点的切负荷量由对应柱形图上方的白色方块表示。切负荷量、切负荷成本、投资成本和韧性评估结果 R<sub>A</sub> 如表 3 所示。

场景 1 的线路加固策略使得配电网抵御外界干扰的能力增强,与未采取任何优化策略的配电网相比,切负荷成本降低至 86 845 元,降幅达到 75.6%,系统负荷损失和切负荷成本大幅度降低。

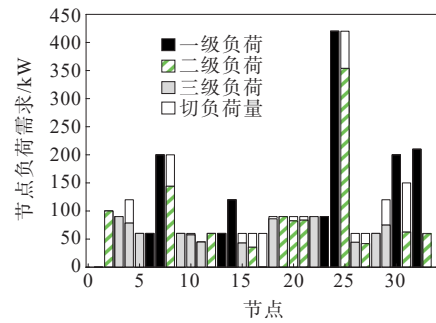
在场景 2 的线路加固和优化联络开关闭合方案联合优化下,通过改善负荷恢复的供电路径显著提升了配电网韧性,切负荷成本降低至 55 200 元,与场景 1 相比降幅达 36.4%,配电网的切负荷量和切负荷成本进一步降低。



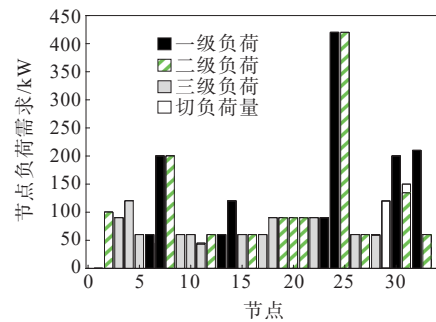
(a) 场景 1



(b) 场景 2



(c) 场景 3



(d) 场景 4

图 7 各节点切负荷量情况

Figure 7 Load shedding of each node

表 3 配电网韧性评估结果

Table 3 Evaluation results of distribution network resilience

场景	切负荷量/(kW·h)	切负荷成本/元	投资成本/元	R <sub>A</sub>
1	4 675.0	86 845.0	182 400	0.807
2	2 757.0	55 200.0	182 595	0.877
3	2 315.5	34 127.5	183 049	0.924
4	695.5	6 501.0	183 244	0.986

配电网在场景3和场景4的联合优化下,进一步提升了配电网韧性。为减少关键节点的切负荷量,利用DG为故障区域内面临断电风险的关键负荷提供供电支撑,保障了所有一级负荷的供电,极大降低了切负荷量与切负荷成本,与场景1相比,场景3和场景4的切负荷成本降幅分别达60.7%和92.5%。

4个场景的韧性评估结果 $R_A$ 分别为0.807、0.877、0.924和0.986。因此,可以看出线路加固、优化联络开关闭合方案和配置DG3种韧性提升措施都能有效地提升配电网韧性,并且本文所提出的多种措施联合优化韧性提升策略比单个措施韧性提升策略的韧性提升效果更好,更加显著地提升配电网韧性。

#### 4.2 配电网韧性评估分析

为了验证本文所提出的韧性评估方法的有效性和优越性,现对如下2个场景进行研究。

场景A:考虑线路加固策略,但不考虑负荷重要程度。

场景B:考虑线路加固策略,同时考虑负荷重要程度。

分别采用韧性评估指标 $R_r$ 和 $R_A$ 对配电网进行韧性评估,对它们的韧性评估结果进行分析比较。线路加固后场景A和场景B的切负荷量、切负荷成本和韧性评估结果如表4所示。

表4 场景A、B的配电网韧性评估结果

Table 4 Evaluation results of distribution network resilience in scenario A and B

场景	切负荷量/(kW·h)	切负荷成本/元	$R_r$	$R_A$
A	4 507.5	108 770.22	0.758	0.758
B	4 675.0	86 845.00	0.749	0.807

根据上述结果,根据韧性指标 $R_r$ 表明,场景A的韧性评估结果比场景B好,然而这与实际负荷损失不符。虽然场景A的切负荷量比场景B更少,但其重要负荷损失更多,切负荷成本更高,经济损失更大,场景B的韧性评估结果应该优于场景A。说明在某些特定情况下, $R_r$ 不能对配电网韧性进行准确评估。相比之下,韧性评估指标 $R_A$ 考虑了负荷重要程度的权重,其韧性评估结果与实际情况一致。因此, $R_A$ 能够克服 $R_r$ 的限制,更好地应用于配电网韧性评估。

## 5 结束语

本文重点考虑多种措施联合优化的韧性提升

策略与故障区域内损失负荷的重要程度,提出了一种在极端天气灾害下考虑负荷重要程度的配电网韧性提升策略及评估方法。

1) 综合考虑杆塔加固、优化联络开关方案和配置DG3种韧性提升措施的联合优化,以获得更好配电网韧性提升效果;

2) 将配电网的负荷重要程度纳入韧性评估指标,使得评估结果更加符合实际,同时对减小配电网在极端天气发生时大规模停电事故对关键负荷损失具有重要意义。

但需要指出,本文所述的通过配置DG来提升配电网韧性策略,认为在极端天气发生后,DG能够完成自身修复,保证对配电网进行正常供电。但未考虑DG发生故障后不能正常出力的情况以及DG修复所需的时间,这是下一步将要研究的方向。

#### 参考文献:

- [1] 钟海旺,张广伦,程通,等.美国德州2021年极寒天气停电事故分析及启示[J].电力系统自动化,2022,46(6):1-9. ZHONG Haiwang, ZHANG Guanglun, CHENG Tong, et al. Analysis and enlightenment of extremely cold weather power outage in Texas, U. S. in 2021[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(6): 1-9.
- [2] 李政麒,蔡晔,曹一家,等.美国德州“2·15”停电事故分析及对中国新型电力系统供电充裕度的启示[J].电力科学与技术学报,2022,37(5):17-24. LI Zhengqi, CAI Ye, CAO Yijia, et al. Analysis of “2·15” blackout in Texas and its enlightenment to China’s new power system supply adequacy[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(5): 17-24.
- [3] 吴界辰,汪莹,易海琼,等.中国台湾“3·3”大规模停电事故分析及对未来电网发展的启示[J].电力建设,2022, 43(7):73-79. WU Jiechen, WANG Ying, YI Haiqiong, et al. Analysis of the power outage in Taiwan, China on March 3, 2022 and its implications for future power grid development[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(7): 73-79.
- [4] 赵建军,燕凯,杨东升,等.概率模型在停电事件预测中的应用研究[J].电测与仪表,2022,59(4):164-168. ZHAO Jianjun, YAN Kai, YANG Dongsheng, et al. Research on application of probabilistic model in blackout prediction[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(4): 164-168.
- [5] 李国庆,刘大贵,肖桂莲,等.高占比新能源电网节点停电风险预测[J].电网与清洁能源,2022,38(10):106-115+125. LI Guoqing, LIU Dagui, XIAO Guilian, et al. Risk prediction of node outage in high proportion new energy

- grid[J]. *Power System and Clean Energy*, 2022, 38(10): 106-115+125.
- [6] 孙立强,李鹏,刘宣廷,等.考虑连锁故障的覆冰灾害下输电线路脆弱性分析模型[J].*高压电器*,2022,58(1):155-161+169.  
SUN Liqiang, LI Peng, LIU Xuanting, et al. Analysis model of transmission line under ice coating disaster considering cascading fault[J]. *High Voltage Apparatus*, 2022,58(1):155-161+169.
- [7] 黄欢,雷加智,曾华荣,等.极端外部环境下输电线路的综合风险评估方法[J].*电力科学与技术学报*,2019,34(2):119-127.  
HUANG Huan, LEI Jiazhi, ZENG Huarong, et al. Integrated risk assessment system of transmission line under extreme external environment[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*,2019,34(2):119-127.
- [8] 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 Zhaozhong, LIN Yanling, QIU Aici. Concept and research prospects of power system resilience[J]. *Automation of Electric Power Systems*,2015,39(22):1-9.
- [9] PANTELI M, MANCARELLA P. Modeling and evaluating the resilience of critical electrical power infrastructure to extreme weather events[J]. *IEEE Systems Journal*,2017,11(3):1733-1742.
- [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] 李京,王国庆,朱建明,等.冰雪灾害背景下电网投资优化和韧性提升模型[J].*中国管理科学*,2020,28(3):122-131.  
LI Jing, WANG Guoqing, ZHU Jianming, et al. Investment optimization and resilience enhancement of power system under ice storm disaster[J]. *Chinese Journal of Management Science*,2020,28(3):122-131.
- [12] 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+681  
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+681.
- [13] 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 Yongjun, XUE Yusheng, XIE Yunyun, 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.
- [14] ZHANG G, ZHANG F, ZHANG X, et al. A multi-disaster-scenario distributionally robust planning model for enhancing the resilience of distribution systems[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*,2020,122:106161.
- [15] 高海翔,陈颖,黄少伟,等.配电网韧性及其相关研究进展[J].*电力系统自动化*,2015,39(23):1-8.  
GAO Haixiang, CHEN Ying, HUANG Shaowei, et al. Distribution systems resilience: an overview of research progress[J]. *Automation of Electric Power Systems*,2015, 39(23):1-8.
- [16] PANTELI M, PICKERING C, WILKINSON S, et al. Power system resilience to extreme weather: fragility modeling, probabilistic impact assessment, and adaptation measures[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*,2017, 32(5):3747-3757.
- [17] YANG Y H, TANG W H, LIU Y, et al. Quantitative resilience assessment for power transmission systems under typhoon weather[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 40747-40756.
- [18] GAUTAM P, PIYA P, KARKI R. Resilience assessment of distribution systems integrated with distributed energy resources[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2021,12(1):338-348.
- [19] SALMAN A M, LI Y, STEWART M G. Evaluating system reliability and targeted hardening strategies of power distribution systems subjected to hurricanes[J]. *Reliability Engineering & System Safety*,2015,144:319-333.
- [20] OUYANG M, DUEÑAS-OSORIO L. Multi-dimensional hurricane resilience assessment of electric power systems [J]. *Structural Safety*,2014,48:15-24.
- [21] 唐文虎,杨毅豪,李雅晶,等.极端气象灾害下输电系统的弹性评估及其提升措施研究[J].*中国电机工程学报*,2020,40(7):2244-2254,  
TANG Wenhua, YANG Yihao, LI Yajing, et al. Investigation on resilience assessment and enhancement for power transmission systems under extreme meteorological disasters[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(7): 2244-2254
- [22] OUYANG M, DUEÑAS-OSORIO L, MIN X. A three-stage resilience analysis framework for urban infrastructure systems[J]. *Structural Safety*, 2012, 36/37: 23-31.