

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230719

# 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

郭明鑫, 李少岩, 顾雪平

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

**摘要:** 台风会对配电网系统造成严重影响, 制定架空线路的防风加固规划方案至关重要。为提高配电网抵御自然灾害的韧性, 提出一种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, 通过模拟台风登陆至消亡时刻全过程实时风况信息, 对各线路实施差异化加固。首先, 利用狄利克雷过程混合模型(Dirichlet process mixture model, DPMM)聚类算法提取典型台风登陆场景, 结合风暴轨迹模型和 Batts 风场模型模拟实时台风移动路径和台风风场, 计算配电网线路实时故障概率。然后, 结合台风场景模拟结果和不同设计风速标准下的差异化的架空线路故障率, 建立以多等级线路加固年投资成本、台风过境过程中失负荷成本、停电损失和维修成本最小为目标的双层随机规划模型, 并利用 Benders 分解算法进行求解。最后, 以改进 IEEE33 节点系统为例, 对所提方法有效性进行了验证。

**关键词:** 极端天气; 灾害模拟; 配电网; 韧性提升; 差异化加固

## Differentiated reinforcement planning method for a distribution network considering simulation of the whole process of typhoon disasters

GUO Mingxin, LI Shaoyan, GU Xueping

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** Typhoons can have a serious impact on a distribution network, so it is very important to formulate the windproof reinforcement planning scheme of overhead lines. To improve the resilience to natural disasters, a method for improving distribution network planning based on the whole process simulation of typhoon disasters is proposed. By simulating the real-time wind condition of the whole process from typhoon landing to typhoon extinction, differentiated reinforcement is implemented for each line. First, the Dirichlet process mixture model (DPMM) clustering algorithm is used to extract typical typhoon landing scenarios, and the storm track model and Batts wind field model are combined to simulate the typhoon moving path and wind field, and the real-time fault probability of distribution network lines is calculated. Secondly, combined with the typhoon simulation results and the differential overhead line failure rate in different wind speed standards, a double-layer stochastic programming model is established with the objective of minimizing the annual investment cost of multi-level line reinforcement, the cost of loss of load during typhoon transit, the loss of power outage and maintenance cost. It is analyzed using Benders decomposition algorithm. Finally, taking the improved IEEE33 node system as an example, the effectiveness of the proposed method is verified.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52107092).

**Key words:** extreme weather; disaster simulation; distribution network; resilience enhancement; differentiated reinforcement

## 0 引言

近年来, 由于气候变化导致极端天气和严重自

然灾害频发, 对电力系统安全运行带来重大威胁<sup>[1-2]</sup>。台风作为较为常见的自然灾害, 对电力系统基础设施具有破坏性作用, 当配电网遭到台风袭击时可能直接造成大量用户停电。随着全球变暖的影响, 台风活动频率和强度呈现逐年上升趋势<sup>[3]</sup>。2012年台风“桑迪”使得约 850 万家庭供电中断<sup>[4]</sup>; 2018年台风“利奇马”造成直接经济损失 515.3 亿元<sup>[5]</sup>。因此, 提高

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(52107092); 河北省自然科学基金项目资助(E2019502195)和中央高校基本科研业务费专项基金项目资助(2021MS063)

电网基础设施对台风的抵御能力,对于保障配电网的安全可靠运行有着极为重要的现实意义<sup>[6-7]</sup>。

提高配电网灾前防御阶段韧性水平,首先需要极端灾害进行较为精确地建模分析,根据极端灾害发生的客观规律有针对性地设计规划方案。现有台风灾害下加固规划方法研究中,台风灾害物理建模方面,文献[8]利用参数化风场模型,模拟台风风场内各线路位置的风速变化情况;文献[9]考虑台风参数概率模型,对台风风场参数不确定性进行建模;文献[10]在此基础上考虑概率风场模型以刻画台风风场不确定性,以寻求最坏场景实施韧性提升优化方案;文献[11]以某条历史台风轨迹作为典型台风场景,结合风场模型,将某条台风路径对配电网的影响过程进行仿真。现有台风灾害模拟中,常将台风移动路径简化为指定行进方向的直线<sup>[8-10]</sup>或用历史台风数据<sup>[11]</sup>代替。实际过程中,台风的移动路径和移动速度均受台风移动过程参数影响,简化的模拟方法将导致台风实时移动过程中风速及风向等关键参数计算结果出现较大误差,进而影响台风移动路径模拟结果及架空配电网故障概率评估结果,从而影响加固方案效果;且某地区少量的台风历史路径数据具有较强随机性,采用少量历史数据导致每次规划结果随台风历史数据结果变化较大,使得各次规划结果具有较大不确定性,进而影响灾前加固规划方案的合理性。

此外,在灾前加固规划方面,文献[12-14]分别提出对于输电网、配电网和电-气互联系统线路加固规划方案;文献[15-16]采取移动应急资源配置、分布式电源选址定容与线路加固相结合的方式,制定多维灾前防御阶段韧性提升策略,但均未考虑加固规划方案选取差异性,且认为线路加固后即不再失效,与现实情况存在一定差异;文献[17]针对大规模输电网,提出一种骨干网架优化规划方法,用于制定输电网各线路最优设计风速;文献[18]制定基于综合故障率的加固规划策略,论证了冰雪灾害下利用多级线路故障率差异作为加固规划原则的有效性。

综上所述,现有关于台风灾害下线路加固规划方法研究中,通常采用简化台风灾害模拟方法,使台风移动过程参数计算结果与真实值偏差较大;同时,未考虑台风全过程模拟将导致加固规划结果缺乏可解释性,从而影响其制定真实配电网加固规划方案的现实意义。并且,当前对于加固规划方案研究中通常选用单一等级进行加固,并认为加固后线路不再失效,导致不同地理位置和气象信息的配电网线路无法体现出本质差异,由此制定的加固方案效果不佳,可能导致加固投资过多或不足等问题。

针对现有研究的不足,本文针对配电网在台风灾害下加固规划方案进行研究,提出一种计及全过程台风灾害模拟的配电网差异化加固规划韧性提升方法。通过对台风从登陆起至消亡时刻进行全过程模拟,计算线路实时故障概率信息,以多等级线路设计风速下的综合故障率作为差异化加固规划标准,构建灾前加固规划韧性提升方法模型。

## 1 台风灾害下配电网差异化加固规划韧性提升框架

首先,本文建立台风灾害全过程模型,模拟台风从登陆时刻到消亡时刻的登陆参数、移动路径和风场等具体信息。根据历史台风登陆特征数据,利用基于概率密度的狄利克雷过程混合模型(dirichlet process mixture model, DPMM)聚类算法选取典型台风登陆场景参数,改进登陆参数随意指定问题,模拟更加贴近真实的台风登陆参数信息。其次,采用风暴轨迹模型和 Batts 风场模型计算台风实时移动路径和风场信息,改进台风移动过程中方向角和移动速度为固定值的问题,结合全过程台风灾害模拟结果,通过风速风向联合分布故障率模型计算配电网线路实时故障概率。最后,通过全过程台风灾害模拟,结合架空线路故障率模型,利用线路设计风速差异制定多等级加固标准,构建基于架空线路故障率的差异化加固规划韧性提升方法,建立差异化加固规划模型,模型上层以加固成本最低作为目标函数,下层以台风移动过程中失负荷成本、停电损失和维修成本作为目标函数,对加固等级单一问题和已有差异化加固规划方案中灾害建模简单导致结果可信度较低的问题进行改进。

本文提出的计及全过程台风灾害模拟的差异化加固规划韧性提升方法结构框架如图 1 所示。

## 2 基于台风灾害全过程模拟的架空线路失效概率模型

本节对台风登陆时刻起至台风消亡时刻的台风登陆特征、位置信息、移动路径和台风风场进行全过程模拟,以此计算灾害下实时故障率数据。首先,结合台风历史登陆位置气象数据,构建典型台风登陆场景集;其次,模拟台风登陆后的移动路径与风场信息;最后,通过元件故障率模型,计算台风过境时不同时刻配电网架空线路的实时故障概率。

### 2.1 基于 DPMM 聚类算法的典型台风登陆场景生成方法

台风登陆参数描述了台风登陆时的移动状态,

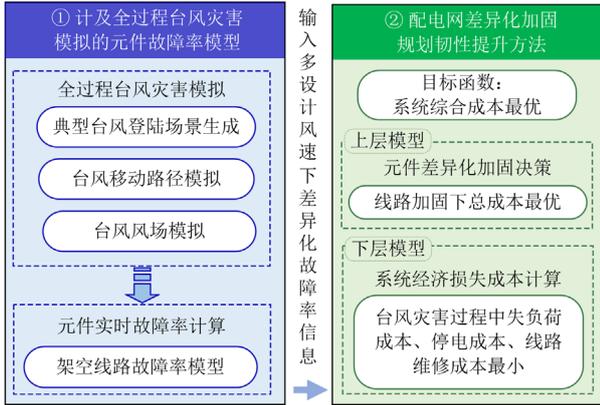


图 1 计及全过程台风灾害模拟的差异化加固规划韧性提升策略框架

Fig. 1 A strategy framework for improving resilience of differentiated reinforcement planning including the whole process of typhoon disaster simulation

其中常用信息包括台风的移动速度、方向角、气压差。它不仅决定了台风登陆时刻的台风状态，也决定了台风登陆后的实时移动状态。因此，选取典型的台风登陆场景至关重要。

DPMM 聚类算法是一种基于概率密度的聚类算法，能够自动确定聚类数目，假设一组样本服从有限高斯分布组成的混合分布<sup>[19]</sup>。对于聚类数目未知、模型中参数具有不确定性且聚类数据服从概率分布的数据具有良好的聚类效果，台风登陆场景数据集与该聚类算法优势数据集契合度较高。首先，其各参数分布均可用高斯分布及其衍生分布表示<sup>[20]</sup>；其次，台风通常涵盖多种类型，但其具体类型参数和类型数目难以直接确定，而 DPMM 聚类算法能够自动确定聚类数目，并能够计算每类中高斯分布参数。因此，本文利用 DPMM 聚类算法选取典型台风登陆场景集。

$N$  个原始台风登陆场景集可表示为  $S = (S_1, S_2, \dots, S_N)$ ， $S_i = (s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{ij}, \dots, s_{im})$  表示台风场景中第  $i$  个场景， $s_{ij}$  表示第  $i$  个场景下第  $j$  个特征值，场景  $S_i$  共有  $m$  个特征值。基于台风场景  $S_i$ ，按照式(1)~式(4)构建狄利克雷过程混合模型。

$$z_i \sim \text{Mult}(\boldsymbol{\Pi}), i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

式中： $z_i$  为第  $i$  个台风登陆场景集所属类的类别编号； $\text{Mult}(\boldsymbol{\Pi})$  为参数向量为  $\boldsymbol{\Pi}$  的多项式分布。

$$\boldsymbol{\Pi} = (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{K+1}) \sim \text{DP}(\alpha_0, H) \quad (2)$$

式中： $K$  为类的总数； $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{K+1}$  为向量  $\boldsymbol{\Pi}$  的参数； $\text{DP}(\alpha_0, H)$  为参数  $\alpha_0$  和  $H$  的狄利克雷分布。

$$\boldsymbol{\Theta}_{z_i} = (\theta_{z_i1}, \theta_{z_i2}, \dots, \theta_{z_im}) \sim \text{Dir}(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m) \quad (3)$$

式中： $\boldsymbol{\Theta}_{z_i}$  为  $z_i$  类的多项式分布产生的第  $i$  个台风场景的特征元素的参数向量； $\text{Dir}$  为参数  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m$  的狄利克雷分布的概率密度函数。

$$S_i = (s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{im}) \sim \text{Mult}(\boldsymbol{\Theta}_{z_i}), i = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

式中： $\theta_{z_i1}, \theta_{z_i2}, \dots, \theta_{z_im}$  为参数向量  $\boldsymbol{\Theta}_{z_i}$  中  $m$  个台风场景特征各自对应的参数。

基于吉布斯采样(Gibbs sampling)的 DPMM 台风登陆场景聚类方法步骤如下。

① 随机生成不大于  $N$  的整数  $K$ ，将  $N$  个台风场景分配到  $K$  个初始典型台风场景类型中。

② 输入初始参数  $\alpha$ 、 $\beta$ 。

③ 将台风场景  $S_i$  从原有典型台风登陆场景类型中删除，更新该典型台风登陆场景类型对应的超参数信息，如果这个台风场景特征类型中的台风场景特征的数量为 0，那么删除该场景类型，减少一个初始场景类型。

④ 根据式(5)计算台风登陆场景  $S_i$  在原典型场景类型中的后验概率，并根据式(6)计算台风登陆场景特征  $s_{ij}$  在新典型登陆场景类型中的后验概率，对  $z_i$  重新进行分类，若产生新类型，增加一个初始场景类型。

$$P(S_i | z_i = k) = \frac{\prod_{j=1}^m \prod_{l=0}^{s_{ij}-1} (\beta_j + n_{kj} + l)}{\left( \sum_{j=1}^m s_{ij} \right)^{-1} \left[ \prod_{l=0}^m \left[ \prod_{j=1}^m (\beta_j + n_{kj} + l) \right] \right]} \quad (5)$$

$$P(S_i | z_i = K + 1) = \frac{\prod_{j=1}^m \prod_{l=0}^{s_{ij}-1} (\beta_j + l)}{\left( \sum_{j=1}^m s_{ij} \right)^{-1} \left[ \prod_{l=0}^m \left[ \prod_{j=1}^m (\beta_j + l) \right] \right]} \quad (6)$$

式中： $n_{kj}$  为第  $k$  类台风场景特征类型中第  $j$  维特征元素个数； $K$  为初始典型台风场景类型个数； $P(S_i | z_i = k)$  为台风登陆场景特征在原类型中的后验概率； $P(S_i | z_i = K + 1)$  为台风登陆场景在新类型中的后验概率。

⑤ 分别对台风登陆场景集的每个场景进行如上操作，直至遍历所有场景。

⑥ 重复上述步骤，不断更新每个台风场景所属的典型台风登陆场景类型，并不断更新第  $i$  个场景

特征所在典型台风场景类型中的分布, 当所有特征所属的典型台风场景类型不再变化时, 且达到采样次数后, 输出最终的各典型台风场景类型分布。

图 2 给出了基于 DPMM 算法的台风登陆场景聚类计算流程。

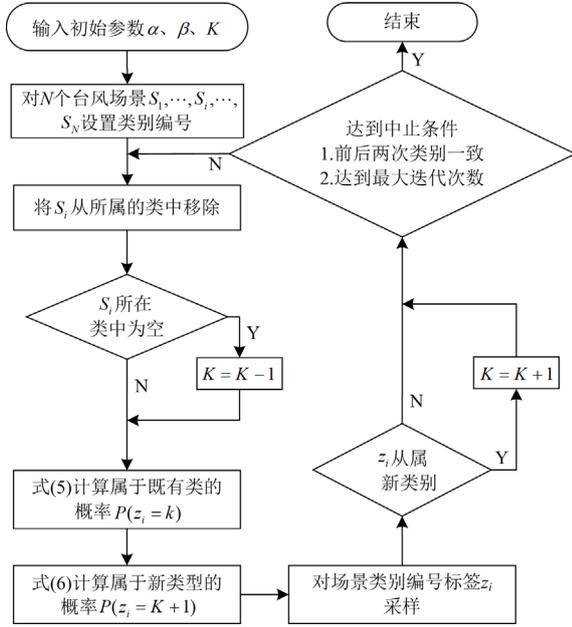


图 2 基于 DPMM 算法的台风登陆场景聚类计算流程  
Fig. 2 Process of typhoon landing scene clustering based on DPMM algorithm

## 2.2 台风移动过程实时模拟方法

台风移动路径过程的实时模拟主要包括台风移动路径模拟和台风风场模拟, 能够对台风移动过程中的实时路径及风况信息进行计算。在本小节中将选用风暴轨迹模型和 Batts 风场模型实现台风移动过程的实时模拟。

### 2.2.1 台风移动路径模拟

风暴轨迹模型是一种能够对台风移动路径进行模拟的数值模拟模型<sup>[21]</sup>, 具有良好的适用性, 实现的具体过程为: 将台风登陆参数作为输入数据, 结合风暴轨迹模型对于已有统计数据拟合得出的参数, 计算出登陆后每一时刻的台风中心位置、移动速度和方向角等特征。

风暴轨迹模型的计算如式(7)和式(8)所示。

$$\Delta \ln v(t+1) = \lambda_1 + \lambda_2 x(t) + \lambda_3 y(t) + \lambda_4 \ln v(t) + \lambda_5 \theta(t) \quad (7)$$

$$\Delta \theta(t+1) = \mu_1 + \mu_2 x(t) + \mu_3 y(t) + \mu_4 v(t) + \mu_5 \theta(t) + \mu_6 \theta(t-1) \quad (8)$$

式中:  $\lambda_1 - \lambda_5$  和  $\mu_1 - \mu_6$  均为风暴轨迹模型参数, 由台风历史数据进行拟合得到;  $x(t)$ 、 $y(t)$  分别为

台风移动过程中  $t$  时刻台风中心位置所处的经度和纬度;  $v(t)$ 、 $v(t-1)$  分别为  $t$ 、 $t-1$  时刻台风中心的移动速度;  $\theta(t)$  和  $\theta(t-1)$  分别表示  $t$ 、 $t-1$  时刻的台风移动方向角, 其角度指向为台风移动方向与正北方向的夹角, 单位为 rad。

### 2.2.2 台风风场模拟

Batts 风场模型能够对台风风场进行模拟, 即可计算台风移动过程中某配电网线路所处位置的实时风速和风向等数据。将台风的影响范围模拟为圆形, 通过圆上某点位置与台风中心位置的距离, 计算风速信息  $V_r(t)$ , 具体计算如式(9)所示。

$$V_r(t) = \begin{cases} V_{R_{\max}}(t) [r(t)/R_{\max}(t)] & r < R_{\max}(t) \\ V_{R_{\max}}(t) [R_{\max}(t)/r(t)]^\alpha & r \geq R_{\max}(t) \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $r(t)$  表示当前位置到台风中心位置的距离;  $R_{\max}(t)$  为邻界距离;  $\alpha$  为常数, 本文取值为 0.6;  $V_{R_{\max}}(t)$  为邻界距离处的风速值, 由最大梯度风速和台风中心移动速度两部分构成, 该风场模型其他参数具体计算方法见文献[22]所示。

## 2.3 考虑风速风向联合分布的台风天气下配电网线路杆塔故障率计算方法

在台风灾害下, 配电网架空线路极易受到损坏造成故障。研究表明, 台风天气下造成杆塔倒杆损坏的概率远大于线路直接被风吹断的概率<sup>[23]</sup>, 由于台风灾害的物理特性, 导致其对地下元件影响极小, 几乎可以忽略不计, 因此本文认为电缆线路在台风灾害下不发生故障, 仅对架空线路故障概率进行计算分析, 本文采用配电网架空线路风速风向联合分布的故障率计算方法<sup>[24]</sup>, 其具体计算如式(10)所示。

$$p_T(v) = \begin{cases} \lambda_{n,T} & v < v_T \\ \lambda_{n,T} + \sin^2 \eta \frac{v^2 - v_T^2}{v_T^2} \lambda_T & v_T \leq v < v_{T,\max} \\ \lambda_{n,T} + \sin^2 \eta (1 - \lambda_T) & v \geq v_{T,\max} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $p_T(v)$  表示杆塔故障率;  $\lambda_{n,T}$  表示某杆塔在正常运行情况下的故障率, 此处取为 0.001;  $v$  为台风实时风速;  $\eta$  为台风风向与线路走向之间的夹角;  $v_T$  为杆塔设计承受风速;  $v_{T,\max}$  为架空线路最大可承受风速, 一般取值为两倍的杆塔设计承受风速;  $\lambda_T$  为台风对杆塔的敏感参数, 此处取值为 0.3317。

因此每条线路正常运行的概率为

$$p_{\text{line}} = 1 - \prod_{\tau=1}^{K_{\text{tower}}} [1 - p_\tau(v)] \quad (11)$$

式中:  $p_{\text{line}}$  表示线路正常运行的概率;  $K_{\text{tower}}$  表示线路中所含的杆塔数量;  $p_\tau(v)$  表示第  $\tau$  个杆塔在风速  $v$  下失效的概率。为提高计算效率, 本文选用每条线

路中点作为该线路承载风速、风向计算参考位置<sup>[25]</sup>。

### 3 基于典型台风场景集下的配电网差异化加固规划韧性提升方法

基于典型台风场景集选取下的配电网差异化加固规划韧性提升方法,通过对典型台风登陆场景的选取、台风风场及移动路径的模拟,构建典型台风场景集,模拟多时步、多种类的台风场景。以配电网线路设计风速作为差异化加固规划标准,通过计算不同设计风速下线路故障率差异,构建多时步台风场景下的差异化加固规划方法。

#### 3.1 优化建模

本文所建立的模型为双层随机规划模型,上层模型为决策层,对线路加固方案进行优选,下层为运行层,对配电网在不同台风场景下的系统损失情况和维修成本等进行计算,如式(12)所示。

$$\min \sum_{(i,j) \in \Omega_L} \sum_{k=1}^{N_k} c_{ij}^k x_{ij}^k + \mu \sum_{m \in \Omega_T} p_m \sum_{n \in \Omega_G} s(m,n) \quad (12)$$

式中:  $\Omega_L$  表示配电网线路集合;  $c_{ij}^k$  表示线路  $ij$  在第  $k$  种加固方案下的成本,按加固有效期和贴现率进行折算;  $N_k$  表示可选取的加固总等级个数;  $x_{ij}^k$  为 0-1 变量,表示线路  $ij$  是否选择第  $k$  种加固类型, 0 表示该线路不选用该加固类型, 1 表示线路选择该加固方案;  $\mu$  表示每年台风发生的次数;  $\Omega_T$  表示在台风灾害场景集;  $p_m$  表示场景集中每条台风路径发生的概率;  $\Omega_G$  表示线路故障场景集,通过蒙特卡洛仿真抽样获得;  $s(m,n)$  表示在台风场景  $m$  的第  $n$  个故障场景下系统运行时的失负荷成本损失函数。式(12)中第一项表示系统架空线路加固总成本,第二项表示配电网系统因台风灾害造成的经济损失。

上层模型的约束条件如下。

1) 线路加固决策变量约束,如式(13)所示。

$$x_{ij}^k \in \{0,1\}, \forall (i,j) \in \Omega_L, 1 \leq k \leq N_k \quad (13)$$

2) 线路加固决策约束,如式(14)所示。该约束表示每线路仅能选取其中一种加固等级。

$$\sum_{k=1}^{N_k} x_{ij}^k = 1, \forall (i,j) \in \Omega_L \quad (14)$$

3) 经济成本约束,如式(15)所示。

$$\sum_{(i,j) \in \Omega_L} c_{ij}^k x_{ij}^k \leq W_{\text{cost}}, \forall (i,j) \in \Omega_L, 1 \leq k \leq N_k \quad (15)$$

式中,  $W_{\text{cost}}$  表示投入线路加固规划的成本预算。

下层模型计算在台风场景  $m$  的第  $n$  个故障场景下的系统经济损失情况,下层模型的目标函数为

$s(m,n)$ ,具体表达式如式(16)所示,第一项为配电网系统在台风影响过程中的失负荷损失,第二项为台风过境后到系统完成修复前系统的停电损失,第三项为受损线路的修复费用。

$$s(m,n) = \min \sum_{t=1}^{N_t} p_t^s \sum_{i \in \Omega_B} c_i \alpha_{i,t}^s P_{i,t}^s + p_t^s T_{\text{rep}} \sum_{i \in \Omega_B} c_i \alpha_{i,N_t}^s P_{i,N_t}^s + p_t^s \sum_{(i,j) \in \Omega_L} c_{ij}^R (1 - u_{ij,N_t}^s), t \in \{1, N_T\} \quad (16)$$

式中:  $N_t$  为台风对配电网造成影响的总时段数;  $p_t^s$  为在  $t$  时刻下故障场景  $s$  发生概率;  $c_i$  为第  $i$  个节点的负荷权重;  $\alpha_{i,t}^s$  为  $t$  时刻节点  $i$  的失负荷比例;  $P_{i,t}^s$  为  $t$  时刻节点  $i$  的负荷量;  $P_{i,N_t}^s$  为  $N_t$  时刻节点  $i$  的负荷量;  $T_{\text{rep}}$  为一条线路故障修复所需要的时间;  $c_{ij}^R$  为线路  $ij$  修复费用;  $u_{ij,N_t}^s$  为  $N_t$  时刻线路  $ij$  开断状态, 0 表示线路处于正常状态, 1 表示线路处于断开状态;  $\Omega_B$  表示配电网节点集合;  $N_T$  为台风过境开始到所有线路维修完成所需要的总时段数,本文认为风速小于 25 m/s 时系统不再受到影响。

当遍历所有故障场景时,每个故障场景发生的概率  $p_t^s$  如式(17)所示。

$$p_t^s = \begin{cases} \prod_{(i,j|u_{ij,t}^s=0)} p_{ij,t} \prod_{(i,j|u_{ij,t}^s=1)} (1 - p_{ij,t}), & 1 \leq t \leq N_t \\ \frac{\sum_{t=1}^{N_t} p_t^s}{N_t}, & N_t < t \leq N_T \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $p_{ij,t}$  为线路  $ij$  在  $t$  时刻的实时故障率;  $u_{ij,t}^s$  为  $t$  时刻线路  $ij$  开断状态。  $p_{ij,t}$  的计算如式(18)所示。

上式的物理意义为在  $t \in [1, N_t]$  时段,故障场景发生的概率与该时刻配电网线路的实时故障率有关。而  $t \in (N_t, N_T]$  时段为台风过境后的停电状态,故障场景发生概率不再发生变化,本文利用  $N_t$  时段内故障场景发生概率均值进行计算。当采用蒙特卡洛仿真方法抽样时,需要以各次抽样占抽样总数的条件概率作为各故障场景的发生概率。

下层模型的约束条件如式(18)一式(26)所示。

1) 模型上下层关联约束

$$p_{ij,t} = \sum_{k=1}^{N_k} x_{ij}^k p_{ij,t}^k, \forall (i,j) \in \Omega_L \quad (18)$$

式中,  $p_{ij,t}^k$  为线路  $ij$  选择第  $k$  种加固类型时在  $t$  时刻的故障概率。

2) 系统潮流方程

$$\sum_{\{j|(i,j) \in \Omega_B\}} P_{ij,t}^s = \sum_{\{j|(i,j) \in \Omega_B\}} P_{ji,t}^s - P_{i,t}^{g,s} - (1 - \alpha_{i,t}^s) P_{i,t}^{L,s}, \forall i \in \Omega_B \quad (19)$$

$$\sum_{\{j|(i,j) \in \Omega_B\}} Q_{ij,t}^s = \sum_{\{j|(i,j) \in \Omega_B\}} Q_{ji,t}^s - Q_{i,t}^{g,s} - (1 - \alpha_{i,t}^s) Q_{i,t}^{L,s}, \forall i \in \Omega_B \quad (20)$$

式中:  $P_{ij,t}^s$ 、 $Q_{ij,t}^s$  分别为场景  $s$  下线路  $ij$  在  $t$  时刻的线路有功、无功潮流;  $P_{i,t}^{g,s}$ 、 $Q_{i,t}^{g,s}$  分别为电源节点  $i$  在  $t$  时刻下的有功、无功功率输出量;  $P_{i,t}^{L,s}$ 、 $Q_{i,t}^{L,s}$  分别表示节点  $i$  在  $t$  时刻下的有功、无功负荷量;  $\Omega_B$  为配电网节点集合。

### 3) 功率平衡约束

$$U_{ij,t}^s (U_{i,t}^s - U_{j,t}^s) = \frac{R_{ij} P_{ij,t}^s + X_{ij} Q_{ij,t}^s}{U_0}, \forall (i, j) \in \Omega_L \quad (21)$$

式中:  $U_{i,t}^s$ 、 $U_{j,t}^s$  分别表示节点  $i$ 、 $j$  在  $t$  时刻下的电压大小;  $U_0$  表示线路基准电压;  $R_{ij}$  和  $X_{ij}$  分别表示线路  $ij$  的电阻和电抗值。

### 4) 线路潮流约束

$$-(1 - u_{ij,t}^s) P_{ij,\max} \leq P_{ij,t}^s \leq (1 - u_{ij,t}^s) P_{ij,\max}, \forall (i, j) \in \Omega_L \quad (22)$$

$$-(1 - u_{ij,t}^s) Q_{ij,\max} \leq Q_{ij,t}^s \leq (1 - u_{ij,t}^s) Q_{ij,\max}, \forall (i, j) \in \Omega_L \quad (23)$$

式中,  $P_{ij,\max}$ 、 $Q_{ij,\max}$  分别表示线路有功、无功潮流的上限。

### 5) 机组出力约束

$$P_{i,t}^{g,\min} \leq P_{i,t}^{g,s} \leq P_{i,t}^{g,\max}, \forall i \in \Omega_B \quad (24)$$

$$Q_{i,t}^{g,\min} \leq Q_{i,t}^{g,s} \leq Q_{i,t}^{g,\max}, \forall i \in \Omega_B \quad (25)$$

式中,  $P_{i,t}^{g,\max}$ 、 $Q_{i,t}^{g,\max}$  和  $P_{i,t}^{g,\min}$ 、 $Q_{i,t}^{g,\min}$  分别表示电源节点有功和无功出力的上、下限值。

### 6) 电压约束

$$U_i^{\min} \leq U_{i,t}^s \leq U_i^{\max}, \forall i \in \Omega_B \quad (26)$$

式中,  $U_i^{\max}$ 、 $U_i^{\min}$  分别表示节点  $i$  电压的上、下限值。

### 7) 配电网拓扑约束

断线解环思想要求优化模型最终生成的网络中不会有环存在, 则所有可能存在的环都至少需要断开一条线路。断线后的辐射状约束建立如式(27)~式(29)所示。其中, 式(27)表示对于网络中的所有可能存在的环, 至少断开一条线路使其无法连通, 即所有环都不成立; 式(28)表示对于所有根节点之间的可能存在路径, 至少断开一条线路使其不连通, 即所有根节点都不相连; 式(29)表示最终线路数和节点数之间的关系, 即边数=节点数-根节点数。

$$\sum_{i \rightarrow j \in C_H} z_{ij} \leq |C_H| - 1, \forall C_H \in C \quad (27)$$

$$\sum_{i \rightarrow j \in P_H} z_{ij} \leq |P_H| - 1, \forall P_H \in P \quad (28)$$

$$\sum_{i \rightarrow j \in \Omega_L} z_{ij} = |N_{\text{node}}| - |R| \quad (29)$$

式中:  $z_{ij}$  为节点  $i$ 、 $j$  之间的连通变量;  $C$  为网络中所有环构成的集合;  $C_H$  为任意一环;  $P$  为所有根节点之间构成的路径集合;  $P_H$  表示任意量两节点之间的路径;  $N_{\text{node}}$  为系统节点个数;  $R$  为根节点数。

## 3.2 模型求解

本文所建立的模型为双层随机规划模型, 采用了基于 Benders 分解的方法进行求解<sup>[26]</sup>。将上述问题分成主问题和多场景子问题, 主问题是整数规划问题, 对应了第一阶段系统加固规划方案; 子问题是相互独立的系统失负荷成本计算, 各场景在计算系统经济损失后会给予主问题反馈, 主问题将重新求解安排加固规划方案。主问题和子问题之间反复迭代, 直到整体达到最优<sup>[27]</sup>。具体求解过程及求解流程如图 3 所示, 其中  $F_{\text{up}}$  和  $F_{\text{down}}$  分别表示目标函数的上界和下界。

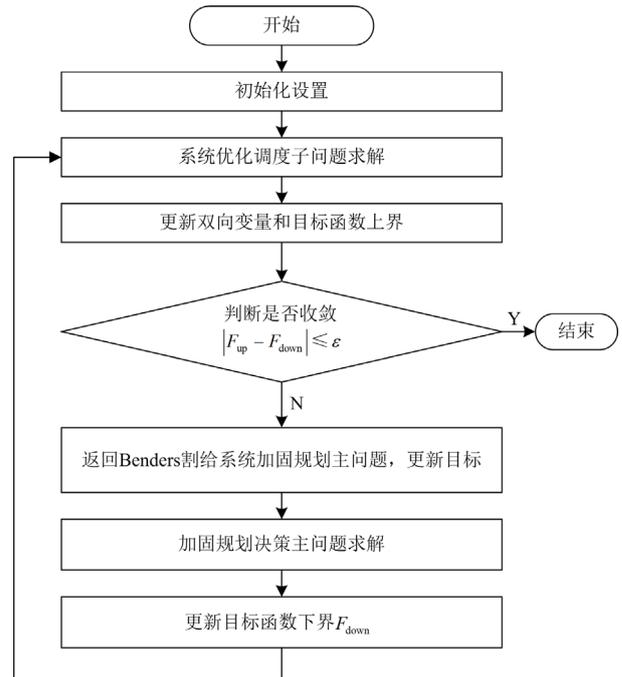


图 3 基于 Benders 分解算法求解流程

Fig. 3 Benders decomposition algorithm solution process

## 4 算例分析

为验证本文所提台风灾害下配电网差异化加固韧性提升方法的合理性和有效性, 本文以改进 IEEE33 节点配电网系统<sup>[28]</sup>为例进行分析验证。其

中, 该配电网系统负荷分为重要负荷和一般负荷, 重要负荷与一般负荷的损失成本比值为 3:1。假设该配电网系统位于广东省近海岸处, 设置坐标原点位于(109.2° N, 21.1° E), 以 km 为计算单位时, 配电网系统中电源节点坐标为(45.1, 50), 台风的仿真步长为 1 h, 该节点系统的各线路长度信息参考文献[14], 本文线路长度为文献[14]的两倍。配电网线路的基础设计风速为 25 m/s。在台风模拟中, 风暴轨迹模拟中的回归系数参考文献[28], 台风每年发生的频次为 1.5 次。

#### 4.1 全过程台风灾害模拟结果

首先对台风的登陆位置进行选取, 结合历史台风数据, 选取湛江市(不包括吴川市、徐闻县、雷州市地区)、吴川市和茂名市 3 个地区作为台风登陆的位置, 以经度等分设置登陆点, 在每个城市的海岸线设置 4 个登陆位置, 如图 4 所示。根据历史台风登陆频次, 可获取台风在不同地区登陆的概率, 台风登陆历史频次可通过文献[29]给出的统计数据得出, 本文具体台风登陆位置选取的经纬度信息和各城市台风登陆频次信息见表 1。

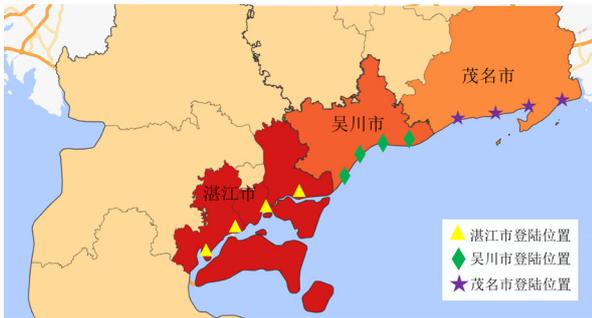


图 4 台风登陆位置设置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of typhoon landing location

表 1 台风登陆频次信息与台风登陆位置

Table 1 Typhoon landing frequency information and landing location

	湛江	吴川	茂名
登陆频次	33	13	24
位置 1	110.48° N 21.21° E	110.67° N 21.25° E	111.05° N 21.46° E
位置 2	110.53° N 21.22° E	110.76° N 21.38° E	111.11° N 21.47° E
位置 3	110.58° N 21.22° E	110.85° N 21.39° E	111.16° N 21.47° E
位置 4	110.63° N 21.22° E	110.94° N 21.42° E	111.22° N 21.49° E

本文选取典型台风登陆场景集的数据来源为中国台风网(tcdata.typhoon.org.cn)热带气旋年鉴<sup>[30-31]</sup>,

此处选取的典型台风登陆场景的特征有台风中心气压差、登陆方向角以及台风中心移动速度。其中, 台风中心气压差为台风登陆时中心气压与标准大气压的差值, 标准大气压为 1013 hPa, 登陆方向为北偏西方向角。研究表明, 3 种登陆特征之间不存在明显相关性<sup>[23]</sup>, 因此对 3 种特征元素分别进行 DPMM 聚类, 选取每类拟合高斯分布函数中的概率密度最高点作为聚类中心, 典型台风登陆场景的聚类结果如表 2 所示。

表 2 基于 DPMM 聚类的典型登陆场景信息及概率

Table 2 Information and probability of typical landing scenarios based on DPMM clustering

移动速度/(km/h)	方向角/rad	气压差/hPa	概率
26.888	1.134	35.851	0.037 972
26.888	1.134	37.781	0.085 434
26.888	1.053	35.851	0.052 53
26.888	1.053	37.781	0.118 188
26.888	1.212	37.781	0.031 345
26.888	1.212	35.851	0.013 931
24.731	1.134	35.851	0.073 908
24.731	1.134	37.781	0.166 286
24.731	1.053	37.781	0.230 039
24.731	1.053	35.851	0.102 243
24.731	1.212	35.851	0.027 116

本文选取了 12 个登陆位置, 与表 2 中计算得出的 12 个典型台风登录参数进行结合, 共生成了 144 个典型台风登陆场景。对前文中的每个登陆场景信息, 分别利用风暴轨迹模型计算其移动轨迹, 每个登陆点存在 12 条台风轨迹, 对于同一登陆位置因登陆特征值不同而形成不同路径集, 将其称为一个台风场景簇, 利用 Batts 风场模型计算其风场信息, 本文台风灾害全过程模拟中各数据来源及取值对应关系如表 3 所示。

表 3 台风参数设置及数据集来源信息

Table 3 Typhoon parameter settings and data set source information

source information		
台风灾害模拟步骤	用到的台风数据	数据来源
	台风中心气压差	文献[30-31]
	台风方向角	文献[30-31]
典型登陆场景选取	台风中心移动速度	文献[30-31]
	算例各市登陆频次	表 1
	台风登陆频次数据	文献[29]
风暴轨迹模型	模型参数	文献[21]
	模拟台风路径信息	表 1
台风风场模拟	台风风场计算参数	文献[22]

#### 4.2 台风灾害下差异化加固规划方法结果对比

台风灾害下配电网线路加固方案的差异化, 按

照线路设计风速强化进行实现, 其设计标准及所需费用见表 4 所示, 将不同线路设计风速对应不同加固等级的成本按照文献[32]进行设置。其中, 线路加固成本为单次加固成本, 其对应的加固有效期为 10 年, 贴现率为 0.1, 对于之后加固方案对比分析中线路加固成本也均按等年值进行计算。杆塔档距为 100 m, 失电成本为 10 美元/kWh, 线路维修成本与线路长度成正比, 其线路修复单价为 2000 美元/km<sup>[10]</sup>, 线路修复时间设置为 6 h, 在本小节中假设加固预算为 40 000 美元。

表 4 架空线路加固等级选取与成本

Table 4 Over-head line reinforcement grade selection and cost

加固等级	设计风速/(m/s)	成本/(美元/km)
不加固	25	0
I型加固	28	7029.65
II型加固	30	11 716.11
III型加固	33	22 480.23
IV型加固	35	36 524.28

为验证本文所提方法的有效性, 本文参考现有研究和工程应用中使用的加固规划原则和核心思路, 分别对比了现有研究中设定加固后不再失效的情况<sup>[11,14]</sup>、现有沿海地区加固标准中依据与海岸线距离进行按风区加固的方法<sup>[33-34]</sup>和实际加固工程中将所有线路均实施加固的方式进行对比研究, 以此设置 4 种加固规划方案:

- ① 采用 II 型线路加固等级加固方案;
- ② 采用 IV 型线路加固等级加固方案;
- ③ 采用按风区进行线路加固规划方案;
- ④ 采用差异化加固规划方案。

对于上述 4 种情况在当前预算下的整体加固规划综合成本等信息如表 5 所示。

表 5 不同防风加固规划方案结果对比

Table 5 Comparison of the results of different windbreak reinforcement planning schemes

加固形式	加固成本	维修成本	失负荷成本	总成本
II 型加固	26 805.38	7141.22	558 696.57	592 643.17
IV 型加固	39 805.08	8090.24	241 982.55	289 877.87
按风区加固	35 313.70	7586.28	404 768.08	447 668.06
差异化加固	39 965.66	5551.34	157 540.02	203 057.02

对于加固方案①, 由计算结果和加固方案示意图可知, 在仅选择 II 型加固的情况下, 由于本节所提的加固预算完全满足需求, 可对该配电网系统所有线路实施加固措施, 总成本最高, 效果最差。其原因是由于进行全 II 型加固时加固预算没有到达上限, 达不到最好加固效果, 且该加固方法不具有差

异性, 不存在薄弱环节识别和重点加固对象, 因此该加固方案效果较差, 其加固规划结果如图 5 所示。

对于加固方案②, 仅选取 IV 型加固作为加固等级时, 当前预算可实现部分线路加固, 具体加固规划方案如图 6 所示。对于该加固方案而言, 由于算例中的配电网系统为单电源辐射状配电网, 因此在近电源侧的多条线路进行加固, 相较于场景 1 的加固方案而言, 在增加 32.7%的加固成本下使得总成本减少了 51.09%。

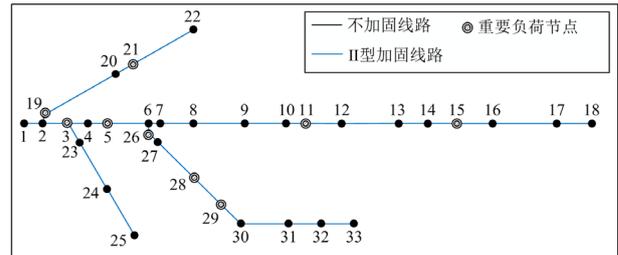


图 5 采用全 II 型线路加固规划方案结果

Fig. 5 Result of type II line reinforcement planning

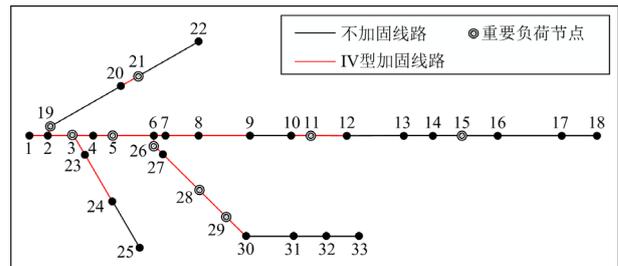


图 6 采用全 IV 型加固规划方案结果

Fig. 6 Result of type IV reinforcement planning

对于加固方案③, 按照配电网系统距离海岸线的直线距离远近采取了按风区加固的措施, 其中该电网近海岸线处由于台风登陆后风速较大设置为 I 类风区, 距离海岸线较远处设置为 II 类风区, 在近海岸线处的 I 类风区电网设置 IV 型加固, 在较远处的 II 类风区设置 III 型加固。该场景下的加固规划方案如图 7 所示, 对于该方案而言, 仅考虑台风灾害的风速大小, 并未将配电网结构和负荷等级等纳入考虑, 导致方案设计较为片面, 对于该配电网而言, 其处于 II 类风区部分为近电源侧, 线路失效将导致配电网失负荷量激增, 但对应加固等级较低, 加固效果不理想。

对于加固方案④, 综合考虑线路故障率、配电网结构及负荷重要度实行差异化加固措施, 在近电源侧重要线路实行高等级加固, 综合考虑线路加固成本及负荷重要度, 对不同线路实施分级加固措施, 其加固成本为 39 965.66 美元, 维修成本为

5551.34 美元, 失负荷成本为 157 540.02 美元。对应前 3 种情况的总成本分别减少 65.74%、29.95%、54.64%, 差异化加固规划方案如图 8 所示。

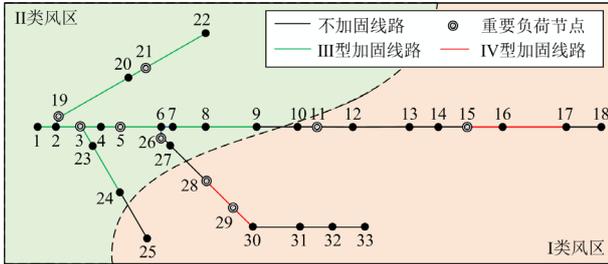


图 7 采用按风区进行加固规划方案结果

Fig. 7 Result of wind zone reinforcement planning

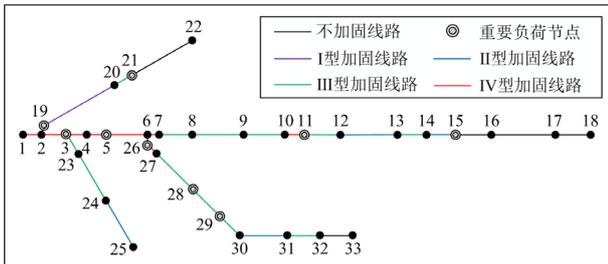


图 8 采用差异化加固规划方案结果

Fig. 8 Result of the differentiated reinforcement planning scheme

### 4.3 选取场景差异对防风加固规划的影响

为验证本文提出的台风灾害全过程模拟的有效性和台风场景集选取差异对最终加固方案的影响, 对已有关于台风灾害加固规划中所采用的台风场景选取方法进行对比与分析, 设置 4 种场景: ① 台风灾害全过程模拟; ② 考虑某登陆位置的单一台风场景簇模拟<sup>[14]</sup>; ③ 某典型台风路径的场景模拟<sup>[11]</sup>; ④ 台风移动过程中的单时步模拟<sup>[17]</sup>。将其纳入 40 000 美元经济预算下加固规划方法中进行计算分析。分别选取以下 4 种台风模拟场景进行对比, 其场景示意如图 9 所示。

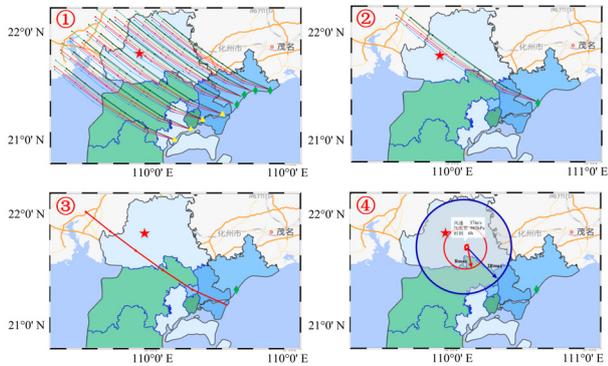


图 9 不同台风场景集选取示意图

Fig. 9 Schematic diagram of different typhoon scenarios

针对不同场景下的加固规划方案对比结果如图 10 所示。对于场景②而言, 单台风场景簇未考虑台风登陆位置的不确定性及台风频次, 在任意选取登陆位置情况下, 将导致综合成本计算结果出现高达 215 016.07 美元的差异; 场景③选取一条台风路径作为灾害模拟信息, 未计及台风登陆位置、登陆参数信息及多条台风移动路径仿真结果, 导致产生高达 246 057.39 美元的差异; 场景④对某一位置的台风风场进行模拟, 未计及台风移动过程, 导致计算结果产生高达 538 080.17 美元的差异。而对于本文所提的计及台风灾害全过程的仿真结果而言, 由于其结合历史数据、计及台风登陆不确定性、台风移动路径仿真和台风风场模拟, 构建了较为完整的台风场景集, 使得加固规划方案的综合成本计算结果唯一, 改进了当前台风灾害下加固规划方案的不确定性, 同时使得最终加固规划结果更具真实性。

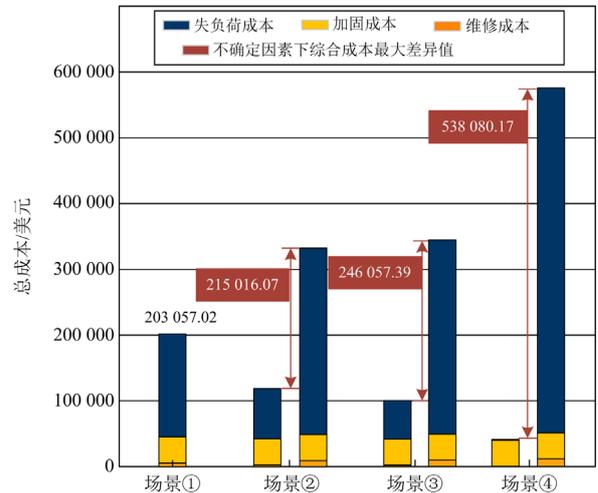


图 10 不同场景下的加固规划方案对比结果

Fig. 10 Impact of scenario difference on windbreak reinforcement planning

### 4.4 不同预算对防风加固规划的影响

为验证本文所提的差异化加固规划方法在不同经济成本预算下的有效性, 本文分别设置 20 000、40 000、80 000、160 000、200 000 美元的加固经济预算对不同类型的加固方案进行对比分析, 其结果如图 11 所示。其中 II 型加固由于成本较低, 在 40 000 美元预算下能够实现全部线路加固, 因此在增加预算后其总成本不再减少。IV 型加固方案在预算为 80 000 美元以上时, 其总成本减少较为明显, 且随着预算的逐渐增加, 架空线路加固数量和加固等级将得到提升, 其与差异化加固规划的总成本差距逐渐减少。按风区进行加固的规划方案由于预算成本的增加, 使得多条线路能够实现加固, 成

本逐渐降低,但由于该方案设置的总体加固等级较低,使线路可靠度低于全IV型加固方案,导致其综合成本略高于IV型加固规划方案。从图11对比得知,差异化加固规划方案在本文设定的预算范围内,其总成本均低于其他加固方案,验证了差异化加固规划方案在不同预算下的有效性。

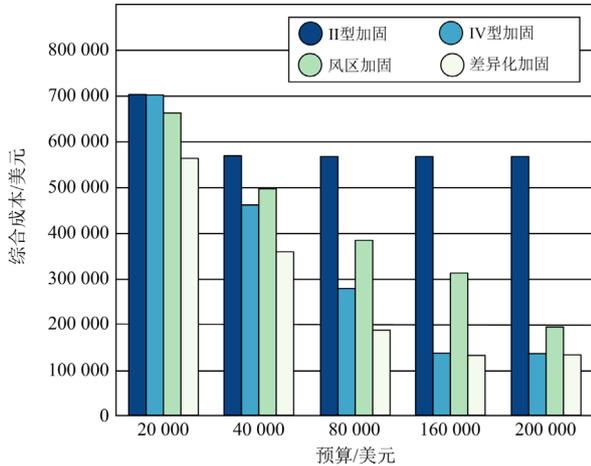


图 11 不同预算下多种加固规划方案对比

Fig. 11 Various reinforcement planning schemes under different budgets

## 5 结论与展望

针对台风灾害下配电网线路加固韧性提升问题,本文提出了一种基于台风灾害全过程模拟的配电网线路差异化加固规划方法。该方法对全过程多类型台风发生、移动和影响范围进行模拟,以不同设计风速标准下配电网架空线路实时故障概率为依据实施差异化加固。通过算例仿真分析,验证了本文所提方法的有效性,并得出以下结论。

1) 计及全过程台风模拟的差异化加固规划方案能够综合考虑线路故障率、配电网结构及负荷重要度等信息,在经济性较高的情况下使得系统可靠度更高并实现不同重要度线路差异化加固,相较于单一类型的加固规划方案,在相同预算成本和同种台风场景灾害下具有更高的线路可靠性和更少的经济损失。

2) 在不同预算条件下,差异化加固规划方案均存在一定程度的经济成本优势,在预算不足以支撑全部线路实行最高等级加固时,差异化加固规划方法具有良好的效果,能够在预算较低情况下减少更多的失负荷成本。

3) 台风场景集的选取差异会对加固规划结果和线路加固规划等级的选择造成影响,选用全过程台风模拟方法可以减少台风灾害下加固规划方案的

不确定性。通过对比单条台风路径、单台风场景簇和某一时步台风场景表明,对于台风场景选取时,在制定加固规划方案时采用全过程的台风场景模拟是极有必要的。

但需要指出,本文所述加固规划方法对台风灾害模拟及台风过境时配电网抵御灾害系统响应情况进行较为精细的建模。如何全面准确地在规划阶段考虑系统恢复、抢修阶段对规划方案造成的影响,将其融入加固规划模型中,将是下一步的研究方向。

## 参考文献

- [1] 傅守强, 陈翔宇, 张立斌, 等. 面向韧性提升的交直流混合配电网协同恢复方法[J]. 中国电力, 2023, 56(7): 95-106.  
FU Shouqiang, CHEN Xiangyu, ZHANG Libin, et al. Coordinated restoration method of hybrid AC/DC distribution networks for resilience enhancement[J]. Electric Power, 2023, 56(7): 95-106.
- [2] 颜文婷, 杨隆, 李长城, 等. 考虑地震攻击交通网影响的配电网韧性评估及提升策略[J]. 上海交通大学学报, 2023, 57(9): 1165-1175.  
YAN Wenting, YANG Long, LI Changcheng, et al. Resilience evaluation and enhancement strategy of distribution network considering impact of seismic attack on transportation networks[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2023, 57(9): 1165-1175.
- [3] WU Jie, GAO Xuejie, ZHU Yingmo, et al. Projection of the future changes in tropical cyclone activity affecting east asia over the Western North Pacific Based on multi-regCM4 simulations[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2022, 31(3): 284-303.
- [4] SALMAN A M, LI Yue, STEWART M G. Evaluating system reliability and targeted hardening strategies of power distribution systems subjected to hurricanes[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2015, 144(12): 319-333.
- [5] 俞拙非, 刘菲, 刘瑞环, 等. 面向配电网弹性提升的源网荷灵活资源优化研究综述及展望[J]. 中国电力, 2022, 55(4): 132-144.  
YU Zhuofei, LIU Fei, LIU Ruihuan, et al. Resilience-oriented optimization of source-grid-load flexible resources in distribution systems: review and prospect[J]. Electric Power, 2022, 55(4): 132-144.
- [6] 张海春, 陈望达, 沈浚, 等. 计及灵活性资源的配电网韧性研究评述[J]. 电力建设, 2023, 44(12): 66-84.  
ZHANG Haichun, CHEN Wangda, SHEN Jun, et al. Review of power distribution network resilience studies

- considering flexibility resources[J]. *Electric Power Construction*, 2023, 44(12): 66-84.
- [7] 梁海平, 石皓岩, 王岩, 等. 基于提升韧性的输电网灾后应急维修策略优化[J]. *中国电力*, 2022, 55(3): 142-151.  
LIANG Haiping, SHI Haoyan, WANG Yan, et al. Resilience-improving based optimization of post-disaster emergency maintenance strategy for transmission networks[J]. *Electric Power*, 2022, 55(3): 142-151.
- [8] MA Shanshan, SU Liu, WANG Zhaoyu. Resilience enhancement of distribution grids against extreme weather events[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(5): 4842-4853.
- [9] 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.
- [10] 侯慧, 刘超, 陈希, 等. 台风灾害下配网两阶段应急抢修恢复优化策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(23): 169-179.  
HOU Hui, LIU Chao, CHEN Xi, et al. Optimization strategy for two-stage emergency repair and recovery of a distribution network after a typhoon disaster[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(23): 169-179.
- [11] 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, 2403.  
TANG Wenhui, 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, 2403.
- [12] 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. Typhoon resilience assessment of distribution network considering grid reconfiguration and restoration process of disaster area[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(6): 47-52.
- [13] BAGHERI A, ZHAO Chaoyue, QIU Feng, et al. Resilient transmission hardening planning in a high renewable penetration era[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(2): 873-882.
- [14] HU Bo, LI Mushui, NIU Tao, et al. Hardening planning of overhead distribution lines in typhoon-prone areas by considering the typhoon motion paths and the line load reliability[J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2021, 129.
- [15] 张亚超, 易杨, 胡志鹏, 等. 基于分布鲁棒优化的电-气综合能源系统弹性提升策略[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(13): 76-84.  
ZHANG Yachao, YI Yang, HU Zhipeng, et al. Resilience enhancement strategy of electricity-gas integrated energy system based on distributionally robust optimization[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(13): 76-84.
- [16] 邹波, 孙可, 胡成鹏, 等. 台风天气下配电系统韧性提升策略[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2021, 33(7): 135-142.  
ZOU Bo, SUN Ke, HU Chengpeng, et al. Resilience enhancement strategy for power distribution system under typhoon weather[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2021, 33(7): 135-142.
- [17] 陈昌铭, 龚贤夫, 娄源媛, 等. 考虑差异化加固的全阶段抗灾型骨干网架两阶段优化规划[J]. *电网技术*, 2023, 47(2): 763-775.  
CHEN Changming, GONG Xianfu, LOU Yuanyuan, et al. Two-stage optimal planning of all-stage anti-disaster backbone network considering differential reinforcement[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(2): 763-775.
- [18] 侯俊贤, 吴军, 董飞飞, 等. 考虑综合故障率的线路分段差异化规划方法[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(21): 5437-5445.  
HOU Junxian, WU Jun, DONG Feifei, et al. A method of line segment differentiation planning considering comprehensive fault rate[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(21): 5437-5445.
- [19] 周建英, 王飞跃, 曾大军. 分层 Dirichlet 过程及其应用综述[J]. *自动化学报*, 2011, 37(4): 389-407.  
ZHOU Jianying, WANG Feiyue, ZENG Dajun. Hierarchical Dirichlet processes and their applications: a survey[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2011, 37(4): 389-407.
- [20] 魏巍. 深圳市台风风场数值模拟与危险性分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.  
WEI Wei. Typhoon wind hazard analysis of Shenzhen based on wind-field model numerical simulation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [21] VICKERY P J, SKERLJ P F, TWISDALE L A. Simulation of hurricane risk in the U.S. using empirical track model[J]. *Structural Engineering*, 2000, 126(10): 1222-1237.
- [22] BATTS M E, RUSSELL L R, SIMIU E. Hurricane wind speeds in the United States[J]. *Journal of Structure*, 1980,

- 106(10): 2003-2005.
- [23] 侯慧, 陈希, 李敏, 等. 一种 Stacking 集成结构的台风灾害下停电空间预测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(3): 76-84.  
HOU Hui, CHEN Xi, LI Min, et al. A space prediction method for power outage in a typhoon disaster based on a Stacking integrated structure[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(3): 76-84.
- [24] 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 assessment of smart distribution network under extreme weather[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(9): 60-68.
- [25] 张鑫, 王楠, 王伟, 等. 考虑台风天气的电力系统韧性评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(8): 21-26.  
ZHANG Xin, WANG Nan, WANG Wei, et al. Resilience assessment on power system under typhoon[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(8): 21-26.
- [26] MOUSAVIZADEH S, ALAHYARI A, GHODSINYA S R M, et al. Incorporating microgrids coupling with utilization of flexible switching to enhance self-healing ability of electric distribution systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(3): 300-310.
- [27] 周吟雨, 董厚琦, 曾博, 等. 考虑灵活性潜力的互联网数据中心与配电网双层协同规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(24): 49-59.  
ZHOU Yinyu, DONG Houqi, ZENG Bo, et al. Bi-level approach to internet data-center and distribution network collaborative planning considering the potential of flexibilities[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(24): 49-59.
- [28] 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 Mushui. Overhead line hardening planning considering the effect of typhoon on line load reliability[D]. Chongqing: Chongqing University, 2020.
- [29] 台风登陆频次统计数据与 CMA 最佳路径集信息 [EB/OL]. <https://pan.baidu.com/s/1odQZ8D3ju8DbWkLbGLb4g?pwd=0000>.
- [30] LU Xiaolin, YU Hui, YING Ming, et al. Western North Pacific tropical cyclone database created by the China Meteorological Administration[J]. Advance in Atmospheric Science, 2021, 38(4): 690-699.
- [31] YING Ming, ZHANG Wei, YU Hui, et al. An overview of the China meteorological administration tropical cyclone database[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2014, 31(11): 287-301.
- [32] 张明, 文凯, 李广福, 等. 沿海风速对输电线路工程造价的影响分析[J]. 中国工程咨询, 2013(6): 20-23.
- [33] 66 kV 及以下架空电力线路设计规范: GB50061—2010[S]. 2010.  
Code for design of 66 kV or under overhead electrical power transmission line: GB50061—2010[S]. 2010.
- [34] 南方电网公司配电线路防风设计技术规范: Q/SCG1201012—2016[S]. 2016.

收稿日期: 2023-06-20; 修回日期: 2023-12-30

作者简介:

郭明鑫(1999—), 男, 硕士, 研究方向为电力系统韧性评估与主动提升; E-mail: guomx1999@163.com

李少岩(1989—), 男, 通信作者, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统安全防御与恢复控制; E-mail: shaoyan.li@ncepu.edu.cn

顾雪平(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统安全防御和系统恢复、安全稳定评估与控制等。  
E-mail: xpgu@ncepu.edu.cn

(编辑 张颖)