

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.250163

基于二维水动力模型雨涝灾害下城市配电网差异化规划

袁国庆¹, 陈超强², 李彬¹, 苏盛¹, 朱静¹, 杨洪明¹

(1. 电网防灾减灾全国重点实验室(长沙理工大学), 湖南 长沙 410114;

2. 国网湖南省电力公司长沙供电分公司, 湖南 长沙 410004)

摘要: 近年来, 极端暴雨天气频繁发生, 城市内涝问题日益突出。而地面配电设备在防涝设计标准存在不足, 易导致其在雨涝灾害下受淹停电。为提升配电系统抵御雨涝灾害的能力, 提出了一种基于二维水动力模型的雨涝灾害下城市配电网差异化规划方法。首先, 结合历史降雨数据及地理信息数据, 利用广义极值分布模型计算多年一遇降雨量, 并基于二维水动力模型对研究区域进行模拟仿真。其次, 根据地面配电设备淹没深度, 计算其失效概率, 并结合混合蒙特卡洛抽样法及香农信息熵, 生成并选取典型故障场景。然后, 在综合考虑不同降雨重现期情景下, 以抬升建设投资成本与运行失负荷损失成本之和最小为目标, 构建配电网差异化规划优化模型, 确定各地面配电设备的最优抬升等级。最后, 通过改进的 IEEE33 节点系统仿真验证, 结果表明, 所提优化模型在显著提升配电系统雨涝灾害抵御能力的同时, 有效控制了防涝改造的投资成本。

关键词: 广义极值; FloodArea; 雨涝灾害; 配电网; 差异化规划

Differentiated planning of urban distribution networks under pluvial flooding based on a 2D hydrodynamic model

YUAN Guoqing¹, CHEN Chaoqiang², LI Bin¹, SU Sheng¹, ZHU Jing¹, YANG Hongming¹

(1. State Key Laboratory of Disaster Prevention & Reduction for Power Grid (Changsha University of Science & Technology), Changsha 410114, China; 2. Changsha Power Supply Branch, State Grid Hunan Electric Power Company, Changsha 410004, China)

Abstract: In recent years, extreme rainfall events have occurred frequently, intensifying urban pluvial flooding. Due to insufficient flood-proof design standards, ground-mounted distribution equipment is highly susceptible to inundation and outages during flood events. To enhance the resilience of distribution systems against pluvial flooding, this paper proposes a differentiated planning method for urban distribution networks based on a two-dimensional (2D) hydrodynamic model. First, the generalized extreme value distribution model is used to estimate the multi-year return-period rainfall using historical rainfall data and geographic information, while the study area is simulated with the 2D hydrodynamic model. Second, the failure probability of ground-mounted distribution equipment is evaluated according to its inundation depth. Typical failure scenarios are then generated and selected by combining the hybrid Monte Carlo sampling method and Shannon's information entropy. Then, an optimization model for differentiated distribution network planning is formulated by comprehensively considering multiple rainfall return-period scenarios, with the objective of minimizing the sum of elevation investment costs and load-loss costs. The optimal elevation level of each ground-mounted distribution device is determined accordingly. Finally, simulations based on a modified IEEE 33-bus system verify that the proposed optimization model significantly enhances the distribution system's resilience to pluvial flooding while effectively controlling the investment cost of flood-proof retrofits.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. U1966207).

Key words: generalized extreme value; FloodArea; pluvial flooding; distribution network; differentiated planning

0 引言

随着全球气候变化的加剧, 极端天气事件的频

率和强度显著增加, 其中暴雨、洪水等自然灾害频发, 给电力系统的稳定性和安全性带来了前所未有的挑战^[1-3]。2021年6月, 暴雨天气导致广西电网10 kV及以上线路停运114条, 停运变电站7座, 停电台区4019个, 停电用户29.4万户。相较于变

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(U1966207)

电设施, 配电设备供电半径小, 只能就近布置于用户附近, 选址灵活性不足, 易在极端暴雨天气条件下导致受淹停电。因此, 如何有效应对极端暴雨天气对配电系统的冲击, 提升配电系统的韧性, 成为当前亟待解决的重要问题^[4-5]。目前对于提升配电系统韧性, 主要从灾前部署、应急资源调度等角度开展研究^[6]。实际上, 由于雨涝灾害具有大面积群发故障跳闸的特点, 更重要的是灾前做好防灾规划和差异化设计。

灾前加固是提升配电系统在极端天气影响下韧性的有效措施, 而差异化加固能够在有限的投资成本及资源下, 有效地提升电网应对极端天气的能力。文献[7]提出了基于台风全过程模拟的配电网差异化加固方法, 通过狄利克雷过程混合模型(Dirichlet process mixture model, DPMM)聚类算法识别典型台风场景, 结合不同设计风速标准优化线路加固策略。文献[8-9]创新性地将差异化韧性设计与决策依赖的不确定性建模相结合, 提出了3种线路加固策略, 优化资源分配与投资决策, 以提升电网韧性。文献[10]通过考虑每个组件的脆弱性概率、负载重要性等因素, 采用遗传算法确定电网中最优加固线路。文献[11]综合线路差异化加固及储能配置策略来提升配电系统的韧性。但上述方法都聚焦研究台风灾害下的线路或杆塔进行差异化加固, 台风造成的故障分布在其登陆和路径上具有弥散性, 而雨涝灾害受微地形影响突出, 危害对象相对明确。同时, 雨涝灾害对电力系统的影响不同于台风灾害, 其防护措施也有所差异。针对雨涝灾害只需将地面配电设备进行适当抬升即可防止被淹, 而当前对雨涝灾害引发地面配电设备受淹的差异化防护却鲜有研究。

根据现有的电力系统相关防涝标准, 35~110 kV 电压等级的变电站场地设计标高应高于 50 年一遇的洪水水位或历史最高内涝水位^[12-13]; 以 10 kV 配电箱变、环网柜和分支箱为代表的配电设备参照 35 kV 变电站要求确定设计标高^[13]。配电设备的防涝要求为 50 年一遇的洪水水位或历史最高内涝水位^[13], 但内涝水位往往没有准确记录, 使得配电设备防涝没有明确可执行的标准, 在工程实践中难以有效落实。气象领域对主要城市记录有较准确的历史降水数据, 是设定雨涝灾害防护标准的重要依据。城市防涝标准和法规就是根据历史降水数据和极值分布模型计算多年一遇降水重现水平设置^[14]。因此, 配电设备防涝设计可以借鉴城市防涝标准, 采用历史降雨数据作为参考, 综合不同降雨重现水平作为防涝设计基准。

受微地形影响, 不同地理位置的地面配电设备

所处的积水深度也存在差别。在现有雨涝灾害背景下的配电设备规划中, 存在防护标准不足且难以实施等问题。因此, 可根据不同风险的地面配电设备, 制定差异化基础高度策略, 以有效提高应对雨涝淹没灾害风险的抗灾能力^[15-18]。据此, 本文提出一种雨涝灾害下城市配电网差异化规划方法。首先, 结合历史降雨数据及地理信息数据; 利用极值分布模型对多年一遇降雨进行拟合; 基于二维水动力模型进行极值降雨淹没模拟, 评估地面配电设备在不同时间节点的失效风险; 并建立以抬升投资成本和失负荷成本总和最小为目标的差异化规划优化模型, 制定雨涝灾害下配电设备差异化抬升规划策略, 提升配电系统在极端降雨条件下的抗灾能力。

1 研究方法

1.1 广义极值分布模型

广义极值(generalized extreme value, GEV)分布模型是一种用于计算事件发生概率分布的数学模型, 利用此模型可进行多年一遇降雨极值的拟合计算^[17]。

GEV 分布函数为

$$F(x) = \begin{cases} \exp\left[-\left(1 + \xi \cdot \frac{x - \mu}{\sigma}\right)^{\frac{1}{\xi}}\right], & \xi \neq 0 \\ \exp\left[-\exp\left(-\frac{x - \mu}{\sigma}\right)\right], & \xi = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: x 为年日极值降雨量; ξ 为形状参数, 决定分布的尾部行为和类型; μ 为位置参数, 决定分布的中心; σ 为尺度参数, 控制分布的扩展范围。

GEV 分布中, 通常采取年极值法选择每年最大/最小值作为极值样本, 然后利用极大似然估计法^[18]计算所得极值样本的分布参数, 计算重现期的极值降雨量, 如式(2)所示。

$$x_T = \begin{cases} \mu + \frac{\sigma}{\xi} \left\{ \left[-\ln\left(1 - \frac{1}{T}\right) \right]^{-\xi} - 1 \right\}, & \xi \neq 0 \\ \mu + \sigma \left\{ \ln\left[-\ln\left(1 - \frac{1}{T}\right) \right] \right\}, & \xi = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: x_T 为降雨重现期为 T 时的极值降雨量。

1.2 淹没仿真模型

FloodArea 模型基于 GIS 栅格数据的二维非恒定流水动力模型原理, 与 ArcGIS 平台集成, 可通过仿真分析预测洪水的淹没深度及淹没范围^[19]。淹没过程模拟根据入水方式的不同, 分为洪水漫顶式淹没、洪水溃口式淹没和暴雨式淹没 3 种模式。本文采用 FloodArea 仿真暴雨过程, 得到各时刻的淹没深度分布图。

FloodArea 模型通过 Manning-Stricker 公式计算每个栅格单元与周围 8 个单元之间的洪水流量, 并考虑地形坡向以确定水流方向。Manning-Stricker 计算表达式为

$$V = K_{st} \cdot r_{hy}^{\frac{2}{3}} \cdot L^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中: V 为水量; K_{st} 为地表粗糙情况对水流影响的系数; r_{hy} 为水力半径; L 为地形坡度。栅格间的坡度决定了水流的方向, 每个单元的坡度取决于其最低水位和最高地形高程之间的差异。

2 雨涝灾害下配电网故障场景

2.1 配电设备失效模型

极端暴雨灾害易引发城市内涝, 进而导致配电设备受淹失效, 配电设备故障的主要原因是防涝高度的设定低于洪涝积水深度, 设备受淹停运。城市配电网中环网高压开关柜作为环网供电系统的核心装置, 在遭遇极端强降雨时, 若发生进水故障, 可能导致所辖供电片区多个配电台区停电, 进而引发区域级电力供应中断事故。因此本文主要考虑环网高压柜的受灾失效过程, 其失效过程可采用指数函数拟合方法计算配电设备受淹时失效率^[20-21]。当抬升高度为 $h(k)$ 时, 在 t 时刻设备的失效率 $\lambda_r(t, k)$ 为

$$\lambda_r(t, k) = \begin{cases} \zeta \exp \left\{ 1 + \max \left[0, \gamma \frac{d(t) - (H_B + H_D) - h(k)}{(H_B + H_D)} \right] \right\}, & d(t) > H_B + H_D \\ 0, & d(t) \leq H_B \\ \zeta \exp \left\{ \max \left[0, \left(\gamma \cdot \frac{d(t) - H_D - h(k)}{H_B} \right) \right] \right\}, & H_B < d(t) \leq H_B + H_D \end{cases} \quad (4)$$

式中: k 为抬升等级; ζ 为衰减系数; γ 为阻尼系数; $d(t)$ 为在 t 时刻的积水深度; H_B 为地面配电设备的基础防涝设计高度; H_D 为配电设备内电缆接头对地标高; $h(k)$ 为抬升等级为 k 时对应的抬升高度。

当抬升等级为 k , 总极端暴雨时长 T_n 可看作由若干个小时的时间间隔 Δt 组成, 即可采用串联模型计算 $t \in [0, T_n]$ 时段失效率 $P_f(t, k)$ 。

$$P_f(t, k) = 1 - \exp \left[- \sum_{i=0}^{T_n} \lambda_r(t, k) \Delta t \right] \quad (5)$$

当 $t \in [T_n, T_n + T_f]$ 为暴雨过后的停电时间, 可认为该时间段的故障状态不会发生变化, 采用暴雨最后一个时刻故障状态作为暴雨过后的故障状态, 其中 T_f 为节点修复时间。

利用混合蒙特卡洛抽样对各时刻配电网节点

的状态进行模拟。在极端暴雨发生过程中, 可将配电设备在各时刻之间视为无关联状态, 采用状态抽样法来判断设备是否故障。对于 t 时刻设备 i 的状态 $z_{i,t}$, 生成随机数 $\varepsilon \in [0, 1]$, 比较失效率 P_f 与 ε 的大小, 当 $P_f \leq \varepsilon$ 时, 设备正常, $z_{i,t} = 0$; 当 $P_f > \varepsilon$ 时, 设备失效, $z_{i,t} = 1$ 。

2.2 基于信息熵的典型故障场景选取

配电网的设备数量众多, 在雨涝灾害下易出现大量故障场景。为有效减少场景数量, 需要综合考虑故障场景发生的不确定性, 并基于失效率模型对故障场景进行选取。本文基于信息熵根据配电设备在不同的淹没深度下对应的失效率选取易发生故障配电设备节点, 生成多设备的故障场景, 并选取合理的配电系统故障场景。

香农信息熵^[8]是一种用于量化信息的不确定性或随机性的方法, 一个系统的不确定性越大时, 所包含的信息量越大^[22]。通过计算的熵值可表示系统的不确定性。在遭遇雨涝灾害时, 配电系统是一个在任一时刻都有可能发生故障的不确定系统。配电系统的熵值表达式为

$$W = \sum_{i \in \Omega_B} (-\log_2(p_{i,t})) z_{i,t}, t \in [0, T_n] \quad (6)$$

式中: W 为系统的熵值; Ω_B 为节点集合; $p_{i,t}$ 为节点 i 在时刻 t 的失效率。

基于混合蒙特卡洛抽样法生成 S 个故障场景, 并根据每个时刻的各节点发生失效率及其状态, 计算出不同场景下对应的熵值^[23], 选取熵值概率最大的场景作为雨涝灾害下配电网典型受灾故障场景^[20]。

3 雨涝灾害下配电网差异化规划模型

利用 GEV 分布模型计算多年一遇降雨量; 基于 FloodArea 模型模拟仿真出各节点所处淹没深度; 结合配电设备淹没直接失效率模型以及香农信息熵生成并筛选典型故障场景, 构建极端暴雨内涝灾害下配电网双层优化模型。

3.1 目标函数

基于暴雨内涝灾害下各节点失效风险, 构建双层优化模型。上层为决策层, 以确定各节点最优抬升等级; 下层为运行层, 计算配电系统在雨涝灾害下损失负荷成本。

$$\min \sum_{i \in \Omega_B} \sum_{k=1}^{N_k} x_i^k T_i^k + \sum_{m \in \Omega_r} p_r \sum_{i \in \Omega_B} \left(\sum_{i=1}^{T_n} c_i a_{i,t} P_{i,t}^L + T_f c_i a_{i,T_n} P_{i,T_n}^L \right) \quad (7)$$

式中: N_k 为抬升等级数; x_i^k 表示节点 i 是否选择第

k 种抬升等级, 节点 i 选择第 k 种抬升等级时, x_i^k 为 1, 否则为 0; I_i^k 为节点 i 选择第 k 种抬升等级的成本; m 为某一降雨重现期情景; Ω_r 为降雨重现期情景集合; p_r 为不同情景的概率; c_i 为节点 i 预期单位削减或失负荷成本; $a_{i,t}$ 为节点 i 在时刻 t 的失负荷比例, $a_{i,t} \in [0,1]$; $P_{i,t}^L$ 为节点 i 在时刻 t 的负荷量; a_{i,T_n} 为节点 i 在时刻 T_n 的失负荷比例; P_{i,T_n}^L 为节点 i 在时刻 T_n 的负荷量。

3.2 约束条件

1) 抬升等级约束。确保每个节点最多选择一种抬升等级。

$$\sum_{k=1}^{N_k} x_i^k \leq 1, \forall i \in \Omega_B \quad (8)$$

2) 总投资建设成本约束。

$$\sum_{i \in \Omega_B} \sum_{k=1}^{N_k} x_i^k I_i^k \leq W_{\text{cost}}, i \in \Omega_B \quad (9)$$

式中: W_{cost} 为抬升建设总投资成本。

3) 配电网运行约束。采用线性化 DistFlow 潮流约束^[8]。

$$\sum_{\{j|(i,j) \in \Omega_L\}} P_{ij,t} = \sum_{\{j|(i,j) \in \Omega_L\}} P_{ji,t} - (1 - z_{i,t}) P_{i,t}^g - (1 - a_{i,t}) P_{i,t}^L, \forall i \in \Omega_B \quad (10)$$

$$\sum_{\{j|(i,j) \in \Omega_L\}} Q_{ij,t} = \sum_{\{j|(i,j) \in \Omega_L\}} Q_{ji,t} - (1 - z_{i,t}) Q_{i,t}^g - (1 - a_{i,t}) Q_{i,t}^L, \forall i \in \Omega_B \quad (11)$$

$$V_{j,t} \leq V_{i,t} - \frac{R_{ij} P_{ij,t} + X_{ij} Q_{ij,t}}{V_0} + u_{ij,t} M_1, \forall i \in \Omega_B \quad (12)$$

$$V_{i,t} - \frac{R_{ij} P_{ij,t} + X_{ij} Q_{ij,t}}{V_0} - u_{ij,t} M_1 \leq V_{j,t}, \forall i \in \Omega_B \quad (13)$$

式中: j 为节点; Ω_L 为线路集合; $P_{ij,t}$ 、 $Q_{ij,t}$ 分别为线路 ij 在时刻 t 的线路有功、无功潮流; $P_{ji,t}$ 、 $Q_{ji,t}$ 为线路 ji 在时刻 t 的线路有功、无功潮流; $P_{i,t}^L$ 、 $Q_{i,t}^L$ 分别为负荷有功、无功功率; $P_{i,t}^g$ 、 $Q_{i,t}^g$ 分别为分布式电源的有功、无功出力; $V_{i,t}$ 、 $V_{j,t}$ 分别为节点 i 、 j 在时刻 t 的电压; R_{ij} 、 X_{ij} 分别为线路 ij 的电阻和电抗; V_0 为线路基准电压; $u_{ij,t}$ 为线路状态, $u_{ij,t} = 0$ 为停运, $u_{ij,t} = 1$ 为正常; M_1 为极大数。

4) 线路潮流约束。

$$-u_{ij,t} P_{ij,\max} \leq P_{ij,t} \leq u_{ij,t} P_{ij,\max}, \forall (i,j) \in \Omega_L \quad (14)$$

$$-u_{ij,t} Q_{ij,\max} \leq Q_{ij,t} \leq u_{ij,t} Q_{ij,\max}, \forall (i,j) \in \Omega_L \quad (15)$$

式中: $P_{ij,\max}$ 、 $Q_{ij,\max}$ 分别为线路有功、无功潮流上限。

5) 分布式机组出力约束。

$$P_{i,t}^{g,\min} \leq P_{i,t}^g \leq P_{i,t}^{g,\max}, \forall i \in \Omega_B \quad (16)$$

$$Q_{i,t}^{g,\min} \leq Q_{i,t}^g \leq Q_{i,t}^{g,\max}, \forall i \in \Omega_B \quad (17)$$

式中: $P_{i,t}^{g,\max}$ 、 $Q_{i,t}^{g,\max}$ 及 $P_{i,t}^{g,\min}$ 、 $Q_{i,t}^{g,\min}$ 分别为分布式电源的有功和无功出力的上、下限。

6) 电压约束。

$$U_i^{\min} \leq V_{i,t} \leq U_i^{\max} \quad (18)$$

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

7) 线路状态约束。节点 i 失效会引起与节点 i 相关联的线路停运。

$$u_{ij,t} \leq 1 - z_{i,t}, j \in (\delta(i) \cup \mathcal{G}(i)) \quad (19)$$

式中: $\delta(i)$ 、 $\mathcal{G}(i)$ 分别为节点 i 的子、父节点集合。

3.3 模型求解

本文构建一个双层优化模型, 旨在提升配电网在雨涝灾害下的抵御能力。模型的上层采用遗传算法(genetic algorithm, GA)^[24-26]来确定配电网各节点的最优抬升等级, 并将抬升等级作为决策变量, 综合考虑不同降雨重现期, 并结合不同抬升等级下节点失效概率模型、混合蒙特卡洛抽样法及香农信息熵生成并选取典型故障场景得到各节点状态, 将其传递给下层模型。下层模型则基于各节点状态, 计算系统的最小失负荷成本。通过遗传算法在多代进化过程中不断调整抬升等级, 上层模型根据下层模型的优化结果评估每组抬升等级方案的总成本, 并更新配电节点的抬升等级选择, 循环迭代直至达到最大迭代次数或结果收敛。最终, 模型能够为各配电节点在面临极端暴雨时提供最优的抬升等级选择策略, 从而有效降低系统的淹没风险和抬升建设成本。模型求解流程如图 1 所示。

4 算例分析

本文采用改进的 IEEE33 节点系统来验证所提模型的有效性。其中, 节点系统中的负荷分为重要用户负荷和一般用户负荷, 其中重要用户节点为节点 3、4、6、10、11、15、17、19、24、26、28、33, 重要负荷用户失电成本为 20 元/kWh, 一般负荷用户失电成本为 10 元/kWh, 分布式发电机分别部署在节点 2、6、9、25、29, 节点的平均修复时间为 4 h^[27], 设定最大迭代次数为 200 次, 种群规模为 50。

4.1 降雨数据及淹没模拟

根据美国海洋和大气管理局(national oceanic and atmospheric administration, NOAA)采集某市某

气象站点^[28]的历史气象数据,提取出1970年—2021年的年日极值降雨数据如图2所示。

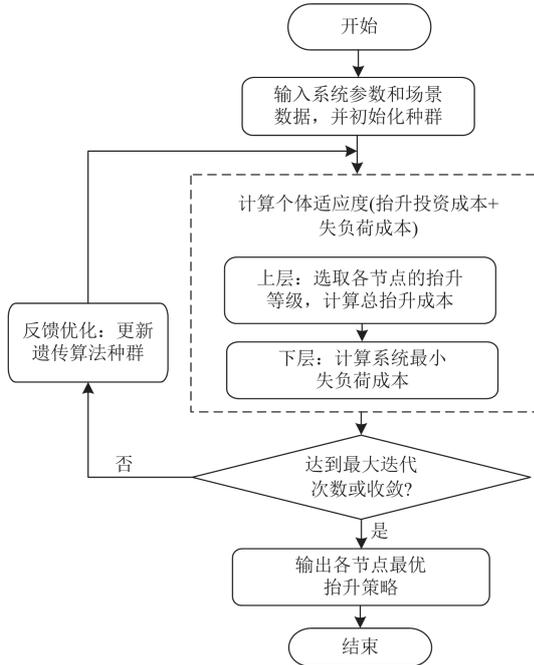


图1 模型求解流程

Fig. 1 Model solving process

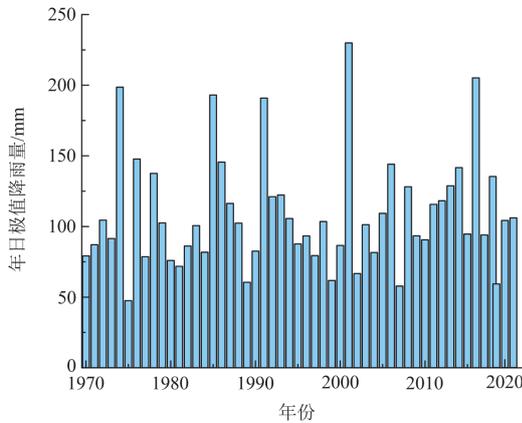


图2 某市年日极值降雨数据

Fig. 2 Annual daily extreme rainfall data for a city

基于年日极值降雨数据,结合极大似然估计法计算 GEV 分布参数:位置参数 μ 为 90.369、尺度参数 σ 为 28.039、形状参数 ξ 为 -0.069,基于各参数计算不同降雨重现期对应的概率及降雨量如表 1 所示。FloodArea 模型中需输入逐小时降雨数据,根据历史某年降雨历时 8 h 日极值总量以及对应 8 h 降雨时序,将其与 GEV 分布模型所得重现期降雨量求得比值,从而计算得到多年一遇降雨重现期 8 h 降雨时序,不同重现期对应的降雨时序如图 3 所示。

其中,100 年一遇表示 1/100 的概率可能发生的降雨量,50 年一遇表示 1/50 的概率可能发生的降雨量。

表 1 不同降雨重现期对应的概率及降雨量

Table 1 Probability and amount of rainfall corresponding to different rainfall return periods

降雨重现期/年	10	20	30	50	100
发生概率	0.1	0.05	0.033	0.02	0.01
降雨量/mm	158.669	182.869	197.349	216.047	242.355

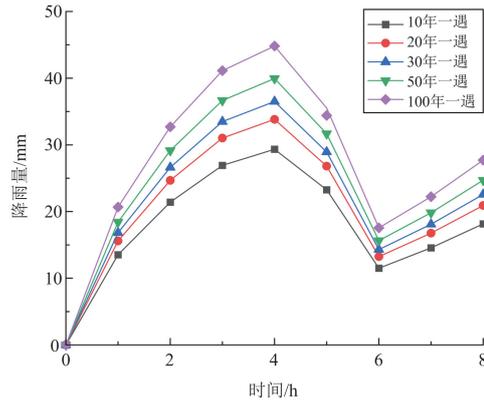


图3 多年一遇降雨时序图

Fig. 3 Chronology of multi-year rainfall events

收集研究区域地理信息数据,主要包括高程数据^[29]以及地表覆盖数据^[30]。根据国家地理信息公共服务平台提供的地表覆盖数据,土地类型可分为人造地表、耕地、水体、林地和草地。水在不同地表类型上流动时,受到的阻力也会存在差异,地表粗糙度将会影响流速和流量的变化。此外,径流系数表示某一时段内径流深度与同期降水量的比值,值越大说明地表的下渗能力越弱,因此地表径流增大,也反映出该土地类型的蓄水能力较差。文献[31]确定了不同地表类型所对应的粗糙度及径流系数,如表 2 所示。利用 ArcGIS 平台,参照表 2 的对应关系,以地表覆盖数据为基准,生成 FloodArea 所需要的径流系数数据以及地表粗糙度数据,其精度均为 12.5 m。

表 2 地表粗糙度及径流系数

Table 2 Surface roughness and runoff coefficient

地表类型	耕地	林地	草地	水体	人造地表
粗糙度	25	18	20	50	6
径流系数	0.35	0.2	0.4	0.1	0.8

将某市城区高程数据、径流系数数据、地表粗糙度数据、多年一遇的降雨数据分别导入 FloodArea 模型,采用暴雨模式进行动态模拟,仿真 8 h 内某市城区受暴雨内涝产生积水的过程,得到研究区域不同降雨重现期的淹没深度和淹没范围,其中图 4 为 50 年一遇雨涝灾害淹没深度分布图。

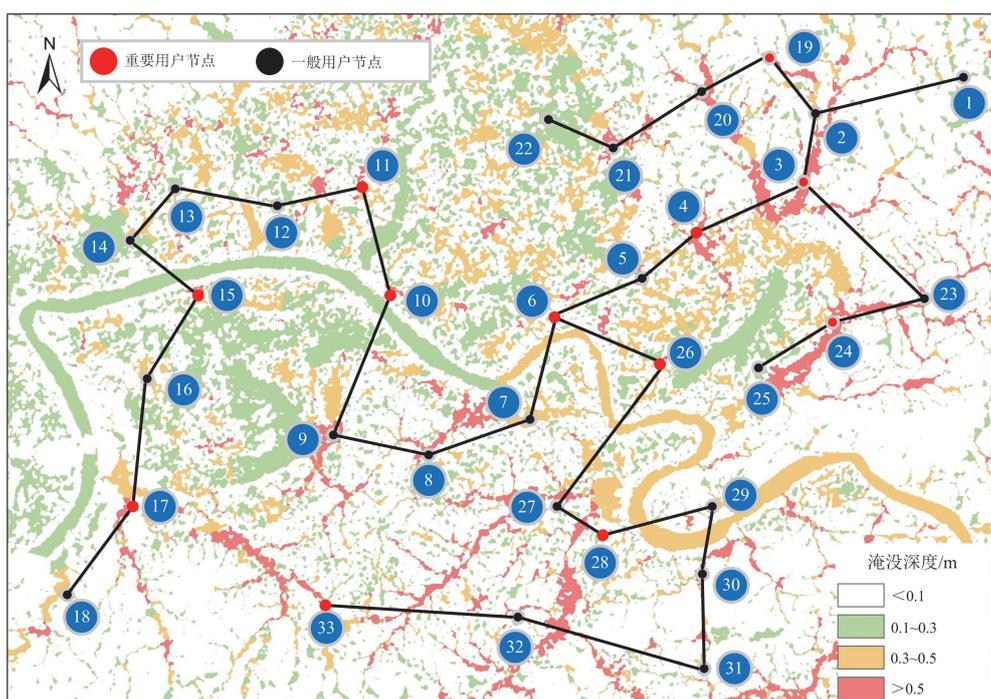


图4 改进 IEEE33 节点系统 50 年一遇雨涝灾害淹没深度分布图

Fig. 4 Distribution of inundation depths in the improved 33-node system for a 50-year rainfall and flooding event

4.2 极端雨涝情景下的城市排水系统影响分析

城市暴雨内涝灾害分析中, 市政排水系统对危害预警预报准确度具有重要影响, 不考虑市政排水系统往往会造成明显偏差。但在工程实际中, 即便市政部门也不一定掌握地下排水管网的准确信息, 如何分析排水系统的影响是暴雨内涝灾害预警的关键难点。一种简化的方式是将多年一遇的淹没结果减去 3 年一遇的淹没结果, 能在一定程度上消除预测偏差^[32-33]。

与常规暴雨内涝灾害预警不同, 本文着眼于多年一遇暴雨内涝的配电设备防灾规划, 考虑通过差异化规划提高极端场景下的电网韧性。实际上, 市政排水系统的排水能力受多重因素影响: 1) 由于地形的限制及造价考虑, 城市排水管网的出水口设置于接近河底, 其出流方式为淹没出流, 排水能力会随河流水位升高而减小^[34]。在汛期河道水位上升时, 排水管网出水口因承受河水的反向压力导致排水不畅, 致使城市雨水管网系统中的低洼区域积涝严重^[35]。2) 在极端降水的影响下, 暴雨可能导致局部电网的送变电设备停运, 使得排水排涝泵站被迫停电退出运行, 从而导致城市排水能力大幅度下降^[36]。为了突出极端降雨条件下地表积水可能对电网地面配电设备带来的影响, 本文研究将城市雨水管渠的排水能力进行简化。通过简化排水过程, 可

以更直观地展现极端降雨量下可能出现的最大淹没范围。以此简化后的模拟结果为基础, 用 ArcGIS 平台提取出多年一遇极端暴雨情形下各配电设备不同时刻的淹没水深, 50 年一遇各节点不同时刻的淹没水深如图 5 所示。

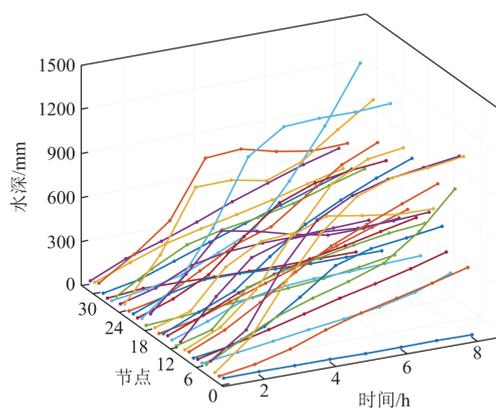


图5 50 年一遇暴雨各节点淹没水深随时间变化曲线图

Fig. 5 Variation of inundation depth at each node with time for a 50-year rainstorm

根据典型设计的要求, 配电设备底部基础高度一般高于地面 $0.3\sim 0.5\text{ m}$ ^[14], 配电设备内部的线路一般高于设备底部约 0.2 m ^[13]。因此, H_B 取 0.3 m , H_D 取 0.2 m 。受地区微地形影响, 不同节点所处的淹

没深度存在差别。例如，在 50 年一遇暴雨情景下，节点 3、4、20、27 的淹没情况较为严峻，最大淹没深度均达到 1 m 以上，而节点 6、13、19、22、25、28 在各时刻的淹没深度均低于配电设备原有的 0.3 m 基础抬升标准。因此，需针对不同节点采取差异化的配电设备抬升方案，以平衡抵御雨涝的风险和控制抬升建设的成本。

4.3 雨涝灾害下配电网差异化抬升策略

本文所指的抬升均在原先基础高度进行。根据现行相关标准^[37]，电力电缆在设备头与接头附近宜留有备用长度。一般地面配电设备电缆预留长度为 1~1.5 m，如果设备最大抬升高度超过预留电缆长度，则需安装电缆头，其成本相对高昂。因此，为了合理控制投资预算，本文最高抬升高度取 1 m，并设定 3 个不同抬升等级，不同等级抬升建设成本如表 3 所示。根据前述优化模型求解各节点最优的抬升等级，以提升配电系统抵御雨涝灾害的能力。

表 3 抬升等级对应的抬升高度及建设成本

Table 3 Elevation heights corresponding to elevation levels and construction costs

抬升等级	抬升高度/m	建设成本/元
I	0.3	5000
II	0.6	10 000
III	1	16 000

通过 FloodArea 仿真模拟得到不同降雨重现期下各个节点的时间序列淹没深度数据，并提取出各节点在不同降雨重现期下的最大淹没深度，如图 6 所示。在统一基础抬升标准下，节点 1、19、22、25、28 在各降雨重现期下均无受淹风险，而其余节点由于持续的降雨，在持续降雨过程中均存在不同程度的受淹风险。

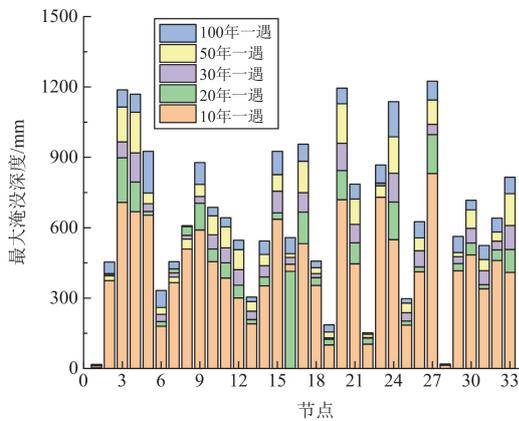


图 6 不同降雨重现期下各节点最大淹没深度图

Fig. 6 Plot of maximum depth of inundation at each node for different rainfall return periods

本文将 10、20、30、50 及 100 年一遇雨涝灾害作为不同的情景，按不同降雨重现期出现概率进行归一化处理，重新划分各情景出现的概率，如表 4 所示。随后，计算不同降雨重现期下，在 8 h 降雨过程中各次抽样的系统熵值，并且以各个时刻熵值概率最大的系统场景作为系统故障场景。各降雨重现期情景下，不同时刻选出的初始场景的熵值如图 7 所示。

表 4 不同场景的概率及失效节点

Table 4 Probabilities and failure points for different scenarios

	情景一	情景二	情景三	情景四	情景五
降雨重现期/年	10	20	30	50	100
概率	0.476	0.238	0.143	0.095	0.048

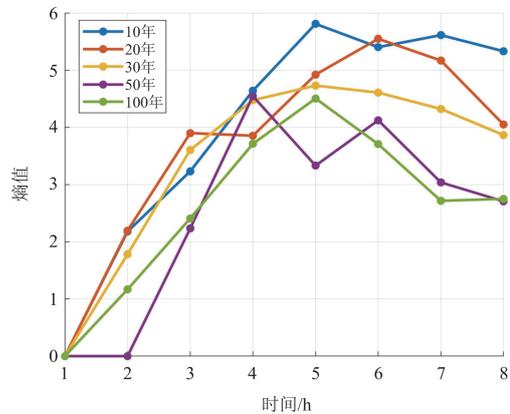


图 7 不同降雨重现期选出初始场景的熵值图

Fig. 7 Entropy plots of initial scenarios selected for different rainfall return periods

根据优化模型计算结果，各节点在综合不同降雨重现期下的遗传算法收敛过程及最优抬升等级选择分别如图 8 和图 9 所示。算法经过 156 次迭代后达到收敛状态，获得全局最优解。由表 5 结果可知，

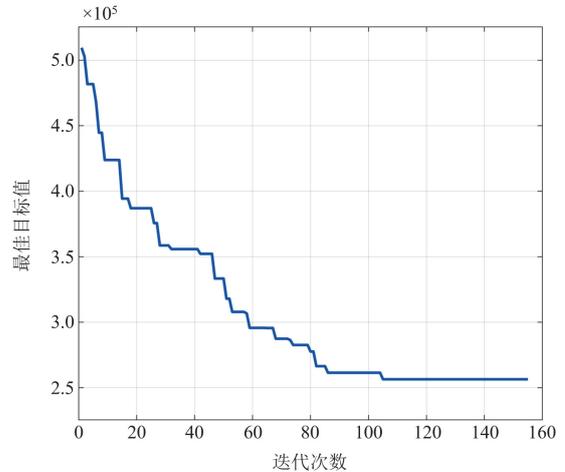


图 8 遗传算法收敛曲线

Fig. 8 Genetic algorithm convergence curve

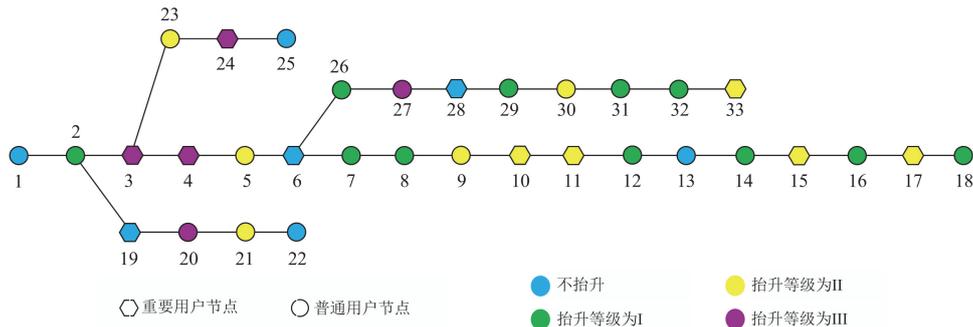


图9 综合不同雨涝灾害重现期下各节点最优抬升等级

Fig. 9 Synthesizing the optimal lifting level of each node under different rainfall and flooding recurrence periods

当总抬升投资成本为 23.5 万元, 得到失负荷惩罚成本为 18 382.8 元。在降雨重现期为 10、20、30、50 年时, 各节点均抬升至无淹没风险, 但在 100 年一遇降雨情景下, 相较于前者发生概率较低, 但对应淹没深度相对较大, 造成淹没风险也更大, 其中节点 5、6、8、13、15、17、26、32、33 在其降雨后期会出现淹没失效风险, 而对于节点 1、19、22、25、28 在各时刻的淹没深度均低于配电设备原有的 0.3 m 基础抬升标准, 因此这些均不需要进行抬升, 其余节点均抬升至无淹没风险等级。

表5 不同抬升策略下对应的成本

Table 5 Corresponding costs under different lifting strategies

方案	抬升策略	总抬升成本/元	失负荷成本/元	总成本/元
一	不抬升	0	547 196.74	547 196.74
二	均按等级 I 抬升	165 000	439 270.09	604 270.09
三	均按等级 II 抬升	330 000	345 372.54	675 372.54
四	均按等级 III 抬升	528 000	0	528 000.00
五	差异化抬升	235 000	18 382.80	253 382.80

为了验证本文所提差异化抬升方法的有效性, 将设置 5 种方案进行对比分析。方案一采取不抬升策略, 以计算出雨涝灾害下系统的失负荷成本, 同时, 方案二、三、四和五分别按等级 I、II、III 以及差异化策略进行抬升, 计算出各方案下抬升成本、失负荷成本及总成本, 从而评估不同抬升策略在降低失负荷成本和总成本方面的效果。由表 5 可知, 随着抬升等级的提高, 负荷损失成本逐步降低, 尤其在抬升等级均为 III 时, 系统负荷损失成本为 0 元, 总成本降至最低至 528 000 元, 体现出较好的投资回报比。相比之下, 差异化抬升策略以较低的投资成本有效降低了失负荷成本, 总成本仅为 253 382.8 元, 其中失负荷成本仅为 18 382.8 元, 与方案一相比, 失负荷成本降低了 96.6%。差异化抬升策略在兼顾经济性的同时, 能够显著降低配电系统淹没停电风险。通过相对较小的抬升投资成本,

差异化抬升策略能够有效提高系统的可靠性, 从而实现经济效益和可靠性之间的平衡, 提升了配电系统抵御雨涝灾害的能力。

4.4 不同投资预算对配电网雨涝防御能力的影响

进一步分析在不同投资预算下, 配电系统抵御雨涝灾害的能力。根据第 4.3 节表 5 的结果, 以综合多年一遇的雨涝灾害作为设计标准时, 最优的抬升成本为 23.5 万元, 对应的系统失负荷成本仅为 18 382.8 元。在此基础上, 本节设定 3 种不同的投资预算方案, 分别为 15 万元、18 万元和 21 万元, 进一步探讨在有限投资预算下, 各节点的最优抬升等级。

由图 10 及表 6 结果可知, 随着投资成本预算增加, 抬升等级及抬升节点的数量随之增加, 失负荷成本显著下降。与采用不抬升策略相比, 当投资预算成本为 15 万元、18 万元及 21 万元时, 失负荷成本分别降低了 38.3%、63.9%与 82.8%。在较为充裕的投资条件下, 系统的失负荷成本下降幅度更为明显。当预算从 18 万元增至 21 万, 仅需增加 3 万元投资, 即可减少 103 540.69 元的失负荷成本。由此可见, 通过增加抬升建设投资, 系统的抵御雨涝灾害能力显著增强, 在高预算下能够降低因雨涝灾害导致的失负荷成本。

结合图 10 进一步分析, 在有限的投资预算下, 其中电源节点及联节点会被优先抬升, 以降低系统的总失负荷量。在投资成本预算为 15 万元下, 节点 2、3、4、7、9、10、23、24、26、29、30 均抬升至无受淹风险等级, 其中包含分布式电源节点 2、9、29 以及联节点 2、3, 而其余节点在不同降雨重现期下均会存在失效风险; 在投资预算增加到 18 万元时, 电源节点和联节点被优先抬升至无淹没风险等级, 但节点 5、8、15、17、20、26 未抬升至无淹没风险等级, 其中 5、8、26 节点只在 100 年一遇降雨情景下出现淹没风险; 而在投资预算为 21

万元时,分布式电源节点及联结节点均无淹没风险,除了重要用户节点 17,其余重要用户在 50 年及其以下降雨重现期均抬升至无淹没风险等级,对于 100 年一遇降雨情景下,其出现概率低,在抬升等级的选择过程中,大部分节点能够有效抵御极端降雨造成的淹没风险,仅节点 5、8、15、26、32 在 100 年一遇降雨下,在降雨第 8 h 会存在淹没失效风险。

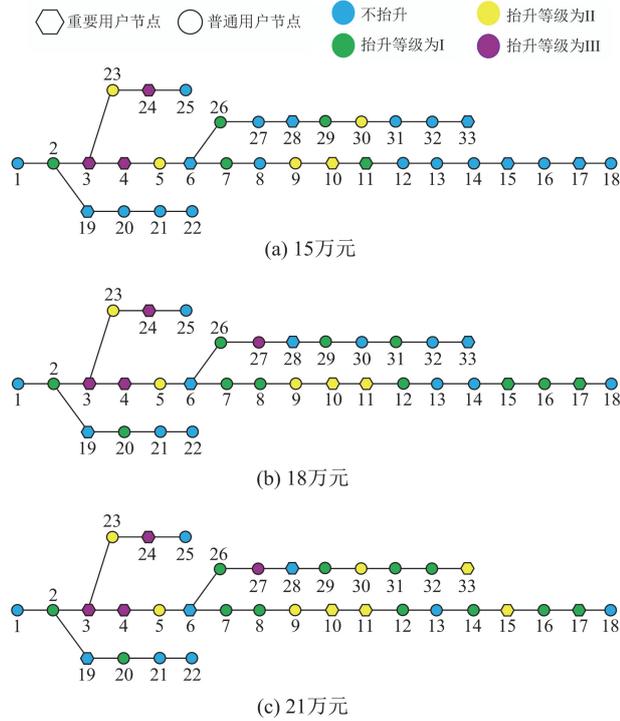


图 10 不同预算下各节点最优抬升等级

Fig. 10 Optimal lift levels for each node under different budgets

表 6 不同预算下对应的失负荷成本及总成本

Table 6 Loss-of-load costs and total costs under different budgets

投资成本预算/万元	抬升成本/元	失负荷成本/元	总成本/元
15	123 000	337 660.45	460 660.45
18	169 000	197 442.85	358 442.85
21	204 000	93 902.16	297 902.16

5 结论

针对极端暴雨天气所致城区配电网雨涝灾害,本文提出一种基于二维水动力模型雨涝灾害下城市配电网差异化规划方法。该方法辨识出雨涝灾害城市配电网薄弱环节,以地面配电设备淹没水深为依据制定差异化抬升策略,对电网防灾减灾及风险管理决策具有重要指导意义。通过算例仿真分析,验证所提方法的有效性,并得出以下结论。

1) 本文结合历史降雨数据及地理信息数据,采

用 GEV 分布模型计算多年一遇降雨量,基于二维水动力模型对研究区域进行淹没仿真分析,得到研究区域淹没深度分布图,为地面配电设备的规划及选址奠定基础。

2) 根据配电设备的典型设计及所处淹没深度,构建不同抬升等级下的失效概率模型;结合混合蒙特卡洛抽样法及香农信息熵,选取典型故障场景,为后续地面配电设备的差异化抬升策略研究提供了依据。

3) 综合不同降雨重现期淹没风险建立了配电设备差异化抬升设计标准。在抬升建设预算有限的情形下,差异化抬升能够显著降低失负荷成本。

本文研究目前主要聚焦于雨涝灾害对地面配电设备的影响分析,未将地下空间变电站纳入考量,这将是进一步的研究方向,未来将结合地下淹没仿真模型,研究地面配电设备与地下变电站协同防涝策略。

参考文献

[1] 于松源,张峻松,元志伟,等. 计及热惯性的热电联产虚拟电厂韧性提升策略[J]. 发电技术, 2023, 44(6): 758-768.
YU Songyuan, ZHANG Junsong, YUAN Zhiwei, et al. Resilience enhancement strategy of combined heat and power-virtual power plant considering thermal inertia[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(6): 758-768.

[2] 许守东,王建,李铭益,等. 极端气象灾害下考虑 MESS 主动调控的配电网故障恢复策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(12): 45-57.
XU Shoudong, WANG Jian, LI Mingyi, et al. Distribution network fault recovery strategy considering active control of a MESS in extreme weather[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(12): 45-57.

[3] 方超颖,许军,丁志龙,等. 山火灾害下输电系统的弹性评估方法及其提升措施[J]. 电力工程技术, 2024, 43(2): 239-247.
FANG Chaoying, XU Jun, DING Zhilong, et al. Resilience assessment method and enhancement measures of power transmission system under mountain fire disasters[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(2): 239-247.

[4] 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.
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.
- [5] 龚立, 王先培, 田猛, 等. 电力信息物理系统韧性的概念与提升策略研究进展[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(14): 169-187.
GONG Li, WANG Xianpei, TIAN Meng, et al. Concepts and research progress on enhancement strategies for cyber physical power system resilience[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(14): 169-187.
- [6] 孔惠文, 马静, 程鹏, 等. 基于灾害场景预估的配电网韧性两阶段故障恢复策略[J]. 电网技术, 2024, 48(9): 3812-3821.
KONG Huiwen, MA Jing, CHENG Peng, et al. Resilience two-stage fault recovery strategy for distribution network based on disaster scenario prediction[J]. Power System Technology, 2024, 48(9): 3812-3821.
- [7] 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 Mingxin, LI Shaoyan, GU Xueping. 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.
- [8] MA S, CHEN B, WANG Z. Resilience enhancement strategy for distribution systems under extreme weather events[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 1442-1451.
- [9] MA S, SU L, WANG Z, et al. Resilience enhancement of distribution grids against extreme weather events[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(5): 4842-4853.
- [10] TARI A N, SEPASIAN M S, KENARI T M. Resilience assessment and improvement of distribution networks against extreme weather events[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 125: 1-10.
- [11] WU J, GU J, LIU S, et al. Strategies for improving resilience of regional integrated energy systems in the prevention-resistance phase of integration[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(2): 477-494.
- [12] 电力规划设计总院. 电力工程水文技术规程: DL/T 5084—2021[S]. 北京: 中国计划出版社, 2021.
- [13] 刘振亚. 国家电网公司配电网工程典型设计(2016年版)10 kV 配电站房分册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 室外排水设计标准: GB 50014—2021[S]. 北京: 中国计划出版社, 2021.
- [15] GAO T, XIE L. Study on progress of the trends and physical causes of extreme precipitation in China during the last 50 years[J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(5): 577-589.
- [16] SUN Q, ZHANG X, ZWIERS F, et al. A global, continental, and regional analysis of changes in extreme precipitation[J]. Journal of Climate, 2021, 34(1): 243-258.
- [17] 王颖, 刘晓冉, 程炳岩, 等. 广义极值分布在重庆短时极值降水中的应用[J]. 气象, 2019, 45(6): 820-830.
WANG Ying, LIU Xiaoran, CHENG Bingyan, et al. Application of generalized extreme value distribution model to short-duration extreme precipitation in Chongqing[J]. Meteorological Monthly, 2019, 45(6): 820-830.
- [18] 陈子燊, 刘曾美, 路剑飞. 广义极值分布参数估计方法的对比分析[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2010, 49(6): 105-109.
CHEN Zishen, LIU Zengmei, LU Jianfei. Comparative analysis of parameter estimation methods of generalized extreme value distribution[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2010, 49(6): 105-109.
- [19] 吴颖晖, 徐硕, 丁宇海, 等. 基于FloodArea的台州10 kV配电网设施暴雨灾害临界雨量研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 129-136.
WU Yinghui, XU Shuo, DING Yuhai, et al. Flash flood critical rainfall research of 10 kV electric distribution network infrastructure based on FloodArea model in Taizhou[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 129-136.
- [20] 闫俊杰. 极端暴雨灾害下城市配电网风险评估及韧性提升研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2024.
- [21] 于浩, 张健, 朱广杰, 等. 基于二维水动力模型与数据融合的电力设施淹没风险动态评估及预警方法[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(15): 71-82.
YU Hao, ZHANG Jian, ZHU Guangjie, et al. Dynamic assessment and early warning method of power facility flood risk based on a 2D hydrodynamic model and data fusion[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(15): 71-82.
- [22] 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.
- [23] 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 Zhenhao, LUO Jianxiao, CHENG Long, 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.
- [24] 李子韵, 成乐祥, 王自桢, 等. 配电自动化终端布局规划方法[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 1271-1276.
LI Ziyun, CHENG Lexiang, WANG Zizhen, et al. A method of layout planning for distribution automation terminal[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 1271-1276.
- [25] 李宗强, 赵耀, 王云, 等. 面向有功潮流最优问题的配电网集群划分策略[J]. 电力工程技术, 2024, 43(3): 151-160.
LI Zongqiang, ZHAO Yao, WANG Yun, et al. Distribution network cluster division strategy for active power flow optimization problem[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(3): 151-160.
- [26] 孙健浩, 初壮. 考虑碳交易和无功补偿的分布式电源优化配置[J]. 发电技术, 2024, 45(1): 142-150.
SUN Jianhao, CHU Zhuang. Optimal configuration of distributed generation considering carbon trading and reactive power compensation[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(1): 142-150.
- [27] 国网山西省电力公司. 国家电网有限公司供电服务“十项”[EB/OL]. (2022-06-08)[2023-03-26]. <http://www.sx.sgcc.com.cn/articles/202206/a1154228.html>
- [28] National Center for Environmental Information. Global historical climatology network-daily[EB/OL]. <https://www.ncei.noaa.gov/access/search/data-search/daily-summaries>
- [29] 李俊杰, 李想, 李彬, 等. 城市配电终端暴雨淹没风险评估方法[J]. 水电能源科学, 2024, 42(10): 20-23.
LI Junjie, LI Xiang, LI Bin, et al. Risk assessment method of urban distribution terminal rainstorm waterlogging[J]. Water Resources and Power, 2024, 42(10): 20-23.
- [30] 张紫怡, 曹妍, 张立亭, 等. 赣州市生境质量和景观格局间时空非平稳性关联[J]. 农业工程学报, 2024, 40(6): 347-356.
ZHANG Ziyi, CAO Yan, ZHANG Liting, et al. Spatial and temporal non-stationary relationship between habitat quality and landscape pattern in Ganzhou City of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(6): 347-356.
- [31] 周杰, 刘晓冉, 康俊. 基于 FloodArea 的三峡库区小流域山洪面雨量分析[J]. 气象科技, 2019, 47(4): 697-704.
ZHOU Jie, LIU Xiaoran, KANG Jun. Comparative analysis of two methods for estimating critical area rainfall of torrential flood disasters in Three Gorges reservoir area based on FloodArea model[J]. Meteorological Science and Technology, 2019, 47(4): 697-704.
- [32] 薛丰昌, 朱一晗, 顾人颖, 等. Floodarea 模型的城市内涝可视化数值模拟[J]. 测绘科学, 2020, 45(8): 181-187, 198.
XUE Fengchang, ZHU Yihan, GU Renying, et al. Visual numerical simulation of urban waterlogging based on Floodarea model[J]. Science of Surveying and Mapping, 2020, 45(8): 181-187, 198.
- [33] 邓国卫, 孙俊, 徐沅鑫, 等. 基于 FloodArea 模型的成都主城区内涝风险评估[J]. 气象科技, 2024, 52(2): 265-276.
DENG Guowei, SUN Jun, XU Yuanxin, et al. Flood risk assessment in main urban area of Chengdu based on FloodArea model[J]. Meteorological Science and Technology, 2024, 52(2): 265-276.
- [34] 罗鸣, 叶兴成, 王以超, 等. 河道边界水位对管道排水能力的影响分析[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(3): 169-174.
LUO Ming, YE Xingcheng, WANG Yichao, et al. Impact analysis of river boundary water level on drainage capacity of pipeline[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018, 29(3): 169-174.
- [35] 张家立, 丁华凯, 高成, 等. 外河水位顶托下雨水管网排水能力变化的 SWMM 模拟[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(6): 44-49.
ZHANG Jiali, DING Huakai, GAO Cheng, et al. Simulation of changes of drainage capacity of rainwater pipe network caused by the jacking of outer rivers[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2017, 28(6): 44-49.
- [36] 曹应平. 暴雨灾害下城市电-水耦合网络应急联动调度决策模型与方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2023.
- [37] 国家标准委员会. 电气装置安装工程电缆敷设及连接施工规范: GB 50303—2015[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.

收稿日期: 2025-02-27; 修回日期: 2025-06-10

作者简介:

袁国庆(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力气象灾害分析; E-mail: d8047083@gmail.com

陈超强(1973—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为配电网运维管理; E-mail: 905427810@qq.com

苏盛(1975—), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为低压用电安全和电力气象灾害研究。E-mail: cecsheng@163.com

(编辑 张颖)