

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2025.03.006

台风灾害中配电网故障抢修策略

吴龙腾¹, 郭乾¹, 吴杰康^{2*}, 陈冠熹²

(1. 广东电网有限责任公司电力调度控制中心, 广东 广州 510600; 2. 广东工业大学自动化学院, 广东 广州 510006)

摘要:台风灾害对配电线路造成重大冲击,极易引发故障停电,基于此,提出灾时灾后配电网复电性能提升策略。首先,利用台风预测数据和蒙特卡洛抽样法模拟线路故障。随后,结合分布式电源与可控负荷调度,以优先恢复重要负荷供电为目标,构建配电网故障重构模型,实现灾时配电网的灵活调整与负荷优化分配。灾后阶段基于故障线路与抢修队伍的位置,以最大化负荷恢复量和最小化抢修时间为目标,通过优化算法确定抢修顺序,并在抢修过程中协同配电网重构进行优化。以IEEE 33配电系统为例进行仿真分析,验证了所提策略的有效性。结果显示,该策略能够在台风灾害时,有效保障系统内关键负荷的持续供电。在台风灾害后显著缩短抢修时间,显著提升了配电网的复电性能与应急响应能力。提出的策略为台风灾害下的配电线路故障抢修与快速恢复关键负荷供电提供了创新的解决方案与思路,增强配电网抗灾与供电可靠性。

关键词:极端灾害;配电网;复电性能;关键负荷

中图分类号: TM727

文献标志码: B

文章编号: 1007-9904(2025)03-0049-10

Fault Repair Strategy for Distribution Network in Typhoon Disaster

WU Longteng¹, GUO Qian¹, WU Jiekang^{2*}, CHEN Guanxi²

(1. Dispatching control center of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510600, China;

2. School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Typhoon disasters severely impact distribution lines, causing power outages. Thus, this paper proposes a comprehensive strategy for improving the power recovery performance of distribution network during and after disaster. Firstly, typhoon forecasts and Monte Carlo sampling are used to simulate line faults. Then, integrating distributed generation and controllable load scheduling, with the goal of prioritizing the restoration of critical loads, a distribution network fault reconfiguration model is constructed to achieve flexible adjustment and optimized load distribution within the distribution network during disaster. In the post-disaster phase, based on the locations of faulty lines and repair teams, an optimization algorithm determines repair sequences to maximize load restoration and minimize repair time. During the repair process, optimization is achieved through coordinated distribution network reconfiguration. Taking the IEEE 33 distribution system as an example for simulation analysis, the results verify the strategy's effectiveness, ensuring continuous critical load power during typhoons, shortening repair time, and improving restoration performance and emergency response. The strategy provides innovative solutions for rapid fault repair and critical load restoration, enhancing distribution network resilience and reliability.

Keywords: extreme disaster; distribution network; restoring power performance; critical load

0 引言

配电网系统具有错综复杂的系统结构和相对薄弱的运行环节特性^[1],导致其易受台风灾害的影响。这种小概率、高风险的灾害会在短时间内对电力系

统的设备造成严重的干扰,导致配电网系统被迫切除负荷^[2]。由于台风天气的持续影响,导致系统难以在短时间内恢复,可能会进一步导致大面积长时间的停电事故^[3]。以2015年的台风“彩虹”为例,它侵袭了中国的广东省,导致超过1万座的杆塔倒塌,

1 000 多条 10 kV 或更高电压级别的输电线路和配电线路发生跳闸,造成 447 万用户的电力供应中断;2019 年强台风“利奇马”猛烈袭击了浙江等多个省份,其后果是超过 4 000 条配电线路发生故障,并引发了 677 万用户的停电事故。因此,迫切需要研究台风灾害对电网的影响评估手段,从而为电网的防护和恢复策略提供坚实的理论支撑^[4]。

在台风灾害与故障抢修方面,国内外学者进行了相关研究。文献[5-6]基于台风的大量历史资料,运用熵权法和层次分析法,对各项指标进行科学合理的权重分配,综合权重系数,预测台风灾害下输电配电线路受影响程度,从而在灾前阶段对脆弱线路进行加固来提高配电网的防御能力。文献[7-8]提出了移动应急电源的预布置和实时调配,确保应急供电。文献[9-10]提出了分布式电源与联络线结合的协同策略,考虑孤岛划分的前提下进行配电网重构来提高灾后配电网负荷恢复效率。文献[11]提出了电动汽车调度与配电网重构相协调的灾后供电恢复策略。然而,上述文章只考虑了配电网重构与分布式电源以及移动储能之间的协同调度问题,未考虑灾后对故障线路的抢修,且由于台风灾害影响较大,失负荷程度较高,储能等灵活资源对负荷的应急支撑有限,仅依赖灵活资源来提升系统负荷恢复的效果有限。

在此背景下,提出一种在台风灾害情境下,综合考虑分布式电源(distributed generator, DG)负荷重要权重、可控负荷、配电网重构与故障抢修协同的灾时灾后配电网复电性能提升策略。基于台风预测数据,采用蒙特卡洛抽样法对线路故障模型进行模拟^[12],在台风过境后的降负荷运行阶段得到确定的故障线路集合后马上调配进行配电网线路的重构,同时考虑分布式电源的出力和对可控负荷的控制^[13-14],尽可能恢复重要负荷的供电。根据故障线路和抢修队伍所在位置,以最大负荷恢复量和最短抢修时长为目标,获得抢修队伍线路抢修顺序^[15-16]。为充分发挥故障抢修和配电网重构对配电网复电性能提升的双重作用,构建配电网重构与故障抢修协同优化框架,加快台风灾害后系统负荷的供电恢复。本研究将探讨规划与运作方面的难题,通过转换得到一个混合整数线性规划问题,并依托 MATLAB-YALMIP 平台,调用商业求解器 CPLEX 对这一问题

进行求解。在 IEEE 33 节点配电网系统中进行实际测试,以验证本文提出策略的有效性。

1 台风灾区配电线路状态特性

台风可被构建为一种特殊的圆形模型,其特性在于风速在最大风速半径位置达到峰值,并由此向中心和外圈两个方向逐渐降低。在进行模拟台风风场时,由于台风风场具有显著的不对称性,通常认为台风是由两个不同的风矢量叠加形成的,其中一个为台风中心保持静止的圆形环流风场,而另一个则是与台风中心的距离成反比的移动风场^[17-18]。本文选用宫崎正卫移动风场模型和改进型 Rankine 环流风速模型^[19]进行叠加。

1.1 移动风速模型

宫崎正卫移动风速模型是一种常见的台风的移动风场模型,这是一个与大气导向气流相关的大规模风场,目前的计算主要依赖于经验公式,具体的模型如式(1)所示。

$$V_d = V_0 e^{-\frac{\pi r}{K_1 R_{\max}}} \quad (1)$$

式中: K_1 为经验系数,通过实验进行取值; V_0 为台风中心移动速度,可从气象部门发布的台风预报信息中获得; R_{\max} 为最大风速半径; r 为台风风力影响范围内的某点与台风中心之间的距离。

距离 r 可由两点经纬度坐标 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 和地球平均半径 R_w 求得,如式(2)所示。

$$r = R_w \arccos(\sin(y_1) \sin(y_2) + \cos(y_1) \cos(y_2) \cos(x_1 - x_2)) \quad (2)$$

式中: R_w 近似取 6 371 km。

1.2 改进 Rankine 环流风速模型

传统的 Rankine 涡理论模型如式(3)所示。

$$V_r = \begin{cases} \frac{r}{R_{\max}} V_{\max}, & r \in [0, R_{\max}] \\ \frac{R_{\max}}{r} V_{\max}, & r \in (R_{\max}, \infty) \end{cases} \quad (3)$$

式中: V_{\max} 为台风环流风速的最大值。

传统的 Rankine 涡理论模型在台风的内部风速呈直线上升趋势,风速变化过于急剧;特别是在台风的外部区域和台风眼地带,风速会急剧降低。不论在台风的内部还是外部,风速的分布轮廓都相对较窄,这使得模拟结果与真实情况相比显得不够合理。因此,对传统 Rankine 模型进行了修正,通过引入一

个无量纲的风速修正系数,以提高模型预测结果与实际情况的吻合度,如式(4)所示。 V_{\max} 可通过式(5)进行计算。

$$V_r = \begin{cases} \frac{r}{R_{\max}} V_{\max} \frac{1}{1 - \frac{r}{R_{\max}} + \left(\frac{r}{R_{\max}}\right)^2}, r \in [0, R_{\max}] \\ \frac{R_{\max}}{r} V_{\max} \frac{1}{1 - \frac{R_{\max}}{r} + \left(\frac{R_{\max}}{r}\right)^2}, r \in (R_{\max}, \infty) \end{cases} \quad (4)$$

$$V_{\max} = V_{\max} - V_d \Big|_{r=R_{\max}} = V_{\max} - V_0 e^{-\frac{\pi}{k_1}} \quad (5)$$

式中: V_{\max} 为台风近中心风速的最大值,这一数据可以从气象部门官方发布的台风预报信息中直接获取。

1.3 最大风速半径的计算

依据台风风场中某一特定点的实际风速为该点移动风速与环流风速的矢量合成,在台风的7级风圈半径 r_7 的特定处一定满足式(6)。

$$V_{d7} + V_{r7} = V_{7\min} \quad (6)$$

式中: V_{d7} 、 V_{r7} 分别对应于为7级风圈的移动风速和环流风速; $V_{7\min}$ 为7级风圈风速下限值,一般取13.9 m/s。

将式(6)整理,可得

$$V_0 e^{-\frac{\pi r_7}{10R_{\max}}} + \frac{R_{\max}}{r_7} V_{\max} \frac{1}{1 - \frac{R_{\max}}{r_7} + \left(\frac{R_{\max}}{r_7}\right)^2} = V_{7\min} \quad (7)$$

通过联合方程式(5)与式(7)可以解出最大风速半径 R_{\max} ,利用 R_{\max} 能够计算出风场中任意一点的移动风速和环流风速。

针对这个方程不能直接进行求解的问题,通过模拟退火算法进行迭代求解,具体求解目标函数如式(8)所示。

$$\min \left\{ V_{7\min} - V_0 e^{-\frac{\pi r_7}{10R_{\max}}} + \frac{R_{\max}}{r_7} V_{\max} \frac{1}{1 - \frac{R_{\max}}{r_7} + \left(\frac{R_{\max}}{r_7}\right)^2} \right\} \quad (8)$$

2 配电网线路故障模型

2.1 区域内线路故障概率模型

为便于分析,将配电网系统进行网格化处理,

具体做法是在经纬度坐标上将配电网划分为若干个网格,每个网格的边长均等于配电网的平均档距。鉴于网格区域相较于台风影响范围显著较小,故可合理假定各网格内所受台风灾害的强度是均一的^[20]。利用每个网格区域的中心点到台风风眼的距离算出该网格内台风风速大小,通过结合配电网元件的脆弱性曲线,可以计算出在 t 时刻,第 n 个网格中线路 h 发生故障的具体概率,如式(9)所示。

$$p_{h,t,n} = \begin{cases} 0, & 0 < V < V_{re} \\ \exp\left[\frac{K_2(V_n - V_{re})}{V_{re}}\right] - 1, & V_{re} \leq V \leq 2V_{re} \\ 1, & V > 2V_{re} \end{cases} \quad (9)$$

$$V_n = V_{r,n} + V_{d,n} \quad (10)$$

式中: V_n 为网格 n 内的实际风速大小; $V_{r,n}$ 、 $V_{d,n}$ 分别为网格 n 内的环流风速大小和移动风速大小; V_{re} 为线路预设的最大可抵抗风速; K_2 为经验系数,通过实验进行取值。

2.2 线路总故障概率

线路被划分到多个网格当中可以视为将同一条线路的多个网格路段以串联方式相连,因此,任一网格的线路段发生故障就会导致整条线路停止运行^[21],因此 t 时刻线路 h 的故障概率为

$$P_{h,t} = 1 - \prod_{n \in \Omega_h} (1 - p_{h,t,n}) \quad (11)$$

式中: Ω_h 为线路 h 所在的网格集合。

3 受灾配电网重构复电能力

图1是配电网系统遭遇极端台风灾害事件全过程的性能曲线,展现了台风灾害对电力系统性能产生的动态影响及其变化情况。图中, T_a 为台风灾害登陆并开始对电力系统展开侵袭时刻; T_b 为电力系统性能出现下滑时刻; T_c 为电力系统开始降额运行时刻; T_d 为台风灾害结束影响并离开该地区的时刻; T_e 为灾害离境后,系统性能逐渐回升的起始时刻; T_f 为系统性能完全恢复并达到正常运行状态的时刻; T_g 为电力系统恢复正常运行时刻。依据台风灾害的演进过程可以根据时间尺度将系统性能的变化曲线细分为灾前($0-T_a$)、灾中(T_a-T_e)和灾后(T_e-T_g)3个阶段。

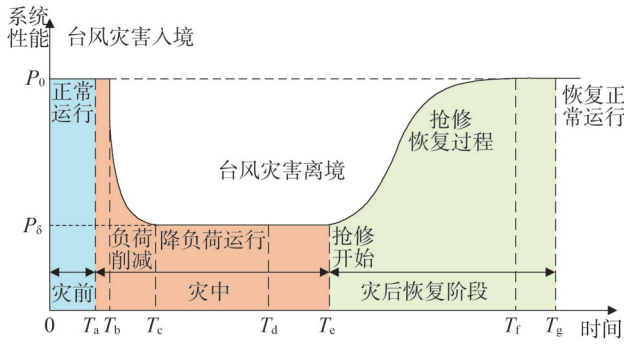


图1 配电网系统灾害全过程性能曲线

Fig.1 Performance curve of the entire disaster process of distribution network system

采用配电网的供电负荷量作为系统性能评估的衡量指标,构建3个评价指标,分别为负荷恢复时间、负荷恢复速率和负荷供缺率,用以全面评估负荷的恢复情况。

1) 负荷恢复时间,如式(12)所示。

$$R_t = \max(T_1, T_2, \dots, T_i) \quad (12)$$

式中: T_1, T_2, \dots, T_i 为各负荷恢复供电的时间节点。

2) 负荷恢复速率,如式(13)所示。

$$R_s = \frac{\sum_{i=1}^B P_i}{R_t} \quad (13)$$

式中: P_i 为灾前节点 i 正常运行的负荷; B 为配电网节点总数。

3) 电量供缺率。

当配电网发生故障后,为确保负荷供电能够逐步恢复正常,应制定详尽的恢复计划。而电量缺供率,它反映了负荷实际供电量的不足与总供电量的比率,是评估电力供应短缺情况的关键指标。

$$R = 1 - \frac{\sum_{i=1}^B \sum_{t=T_d}^{T_g} P_{load,t,i}}{\sum_{i=1}^B P_i \times (T_g - T_d)} \times 100\% \quad (14)$$

式中: $P_{load,t,i}$ 为灾后 t 时刻节点 i 处的负荷。

4 配电网复电能力提升方法

4.1 灾时配电网重构

配电网进行灾时重构的实质是在台风过境之后,配电网多处发生断联,此时并未执行有效的配电网故障抢修策略,系统处于降负荷运行阶段,此时可以通过控制联络线上的常开开关闭合进行网络重

构,为恢复部分非故障区域内关键负荷的电力供应,进而提升配电网系统复电性能。因此,所建立的重构模型以系统重要负荷恢复量最大为目标函数,运用二阶锥优化算法,可以将原本非凸的重构模型成功转化为一个混合整数的二阶锥规划问题^[22],进而能够利用现有的商用求解器进行快速而高效的求解。

4.2 配电网重构优化模型

4.2.1 重构目标函数

配电网重构策略的主要目标是配置联络线路的开合状态,在满足配电网运行的约束条件下是尽可能多地恢复重要失电负荷。此外,重构后运行状态下的网络损耗、电压质量与恢复策略的开关操作次数同样需要综合考虑。因此采取多个目标函数进行规划。

1) 负荷恢复总量最大化。

$$f_1 = \max \left(\sum_{V_e \in C} c_e \omega_e P_{L,e} + \sum_{V_b \in C} Y_b \omega_b P_{L,b} \right) \quad (15)$$

式中: C 为可控负荷集合; c_e 为可控负荷 e 的供电比例; ω_e 为负荷 e 的权重,其值越大表示该负荷恢复顺序越高; $P_{L,e}$ 为负荷 e 的有功负荷; Y_b 为节点 b 的荷电状态,其值为0或1,节点荷电状态变量 Y_b 允许取0,即在重构过程中允许切除负荷运行; ω_b 为负荷 b 的权重。

为保证网络的连通性和结构呈放射状,并允许在负荷无法完全恢复情况下的切负荷操作。可控负荷 e 的供电比例 c_e 满足

$$0 \leq c_e \leq 1 \quad (16)$$

2) 网络损耗最小化。

$$f_2 = \min \left(\sum_{V_{l_j} \in E_1} r_{ij} I_{ij}^2 \right) \quad (17)$$

式中: l_{ij} 为节点 i, j 确定的支路; E_1 为网络中所有闭合支路的集合; r_{ij}, I_{ij} 分别为 l_{ij} 的支路电阻与电流。

3) 电压偏移量最小化。

$$f_3 = \min \left(\sum |U - U_i| \right) \quad (18)$$

式中: U 为基准电压; U_i 为节点 i 的电压。

4) 开关操作次数最小化。

$$f_4 = \min \left(\sum_{V_{l_j} \in E} \left[Y_{ij(0)} (1 - Y_{ij}) + Y_{ij} (1 - Y_{ij(0)}) \right] \right) \quad (19)$$

式中: $Y_{ij(0)}, Y_{ij}$ 分别为支路 l_{ij} 上开关的初始开关状态和当前开关状态,其值为0时,表示支路上的开关闭合;其值为1时,表示支路上的开关断开; E 为网络中所有支路的集合。

最后,进行归一化处理后总的目标函数为

$$f = \sum_{z=1}^4 \lambda_z f_z \quad (20)$$

式中: f_z 、 λ_z 分别为第 z 个目标函数的计算值和权重。

4.2.2 相关约束条件

1)网络拓扑约束。

$$Z_{ij} + Z_{ji} = W_{ij} \quad (21)$$

$$\sum_{\forall l_i \in E} Z_{ji} \leq 1 \quad (22)$$

式中: Z_{ij} 、 Z_{ji} 为线路流通方向变量, $Z_{ij} = 1$ 表示支路 l_{ij} 上的功率由节点 i 流向节点 j , Z_{ji} 同理; W_{ij} 为线路连接状态变量。

2)网络潮流约束。

$$\sum_{j \in \Phi(i)} P_{ji} - \sum_{k \in \Psi(i)} P_{ik} - r_{ij} I_{ji}^2 = Y_i P_i \quad (23)$$

$$\sum_{j \in \Phi(i)} Q_{ji} - \sum_{k \in \Psi(i)} Q_{ik} - x_{ij} I_{ji}^2 = Y_i Q_i \quad (24)$$

$$P_i = P_{DG,i} - P_{L,i} \quad (25)$$

$$Q_i = Q_{DG,i} - Q_{L,i} \quad (26)$$

$$U_i^2 - U_j^2 - 2(r_{ij} P_{ij} + x_{ij} Q_{ij}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) I_{ij}^2 = 0 \quad (27)$$

式中: P_i 、 Q_i 分别为节点 i 的注入有功功率和注入无功功率; P_{ij} 、 Q_{ij} 分别为由节点 i 到节点 j 传输的有功功率和无功功率; r_{ij} 、 x_{ij} 分别为线路 l_{ij} 的电阻和电抗; $\Phi(i)$ 、 $\Psi(i)$ 分别为与节点 i 相连的上游点集合和下游节点集合; $P_{DG,i}$ 、 $Q_{DG,i}$ 分别为位于节点 i 的DG的有功和无功出力。 $P_{L,i}$ 、 $Q_{L,i}$ 分别为节点 i 负荷的有功功率和无功功率。

对于可控负荷节点来说,式(23)和式(24)等号右边注入功率的乘数须用 c_i 替代 Y_i 。

3)DG出力约束。

$$\begin{cases} P_{DG,\min} \leq P_{DG} \leq P_{DG,\max} \\ 0 \leq Q_{DG} \leq P_{DG,\max} \tan \phi \end{cases} \quad (28)$$

式中: $P_{DG,\min}$ 、 $P_{DG,\max}$ 分别为DG有功出力下限和上限; ϕ 为功率因数角,取其上限为定值。

4)电压与电流约束。

$$U_{i,\min}^2 \leq Y_i U_i^2 \leq U_{i,\max}^2 \quad (29)$$

$$0 \leq I_{ij}^2 \leq I_{\max}^2 \quad (30)$$

式子: $U_{i,\min}$ 、 $U_{i,\max}$ 分别为节点 i 电压下限值和上限值; I_{\max} 为电流上限。

5)二阶锥约束。

由于目标函数与约束中所有非线性项多数为线路电流和节点电压的平方项。因此,构造型变量 v_i 、 q_{ij} 分别代替上述所有约束与目标函数中电压与电流

的平方项 U_i^2 和 I_{ij}^2 。

配电网重构模型实际上是每个线路状态下的配电网最优潮流问题的叠加,经过松弛后的可行域转换为一个二阶锥体,形成凸可行域,其二阶锥凸松弛的准确性和可行性已得到验证^[23]。经过进一步转换可得到标准二阶锥形式为

$$\begin{cases} 2P_{ij} \\ 2Q_{ij} \\ q_{ij} - v_i \end{cases} \leq q_{ij} + v_i \quad (31)$$

经转换后的模型的所有决策变量已经能够满足二阶锥算法要求,并且限制其搜索空间在凸锥范围内,可以采用成熟的数学规划求解工具进行求解。

4.3 故障抢修策略

制定科学有效的配电网故障抢修策略有利于缩短配电网恢复时间,加快灾后的复电速度,实现配电网复电性能的提升。本文主要考虑在台风灾害发生后,可计算台风灾害下元件故障概率并生成故障集合。以每次抢修完成可恢复负荷量最大和抢修时间最短为目标函数,采用模拟退火算法生成最优抢修顺序,实现抢修恢复效益最大化,提高系统复电性能^[24]。模拟退火算法的原理源自物理退火过程的启发,它模拟了固体材料由高温状态缓慢冷却至低温状态的过程,以此来求解优化问题。在算法的初始阶段,会选定一个解作为当前解,并设置一个相对较高的初始温度。随后,在当前温度条件下,算法会对当前解进行随机扰动,生成一个新的解,并计算新解与当前解之间的目标函数差异。依据波尔兹曼概率,算法会以一定的概率接受新解,即使新解的目标函数值不如当前解,也有机会被采纳。这一机制使得算法能够在解空间中进行广泛的搜索,有效避免陷入局部最优解。随着温度的逐步降低,算法接受较差解的概率也逐渐减小,搜索过程因此逐渐趋于稳定,并最终收敛至全局最优解或近似最优解^[25]。具体流程如图2所示。

4.3.1 故障抢修目标函数

当配电网遭遇大规模的故障,故障线路数量远大于抢修队伍数量时应该制定合适的故障修复策略。设定的目标函数是确保抢修过程中的总失电量达到最低。

$$\min \left[\sum_{\forall i \notin G} Y_i P_{L,i} + \sum_{g=1}^{G-1} \sum_{\forall j \in G} Y_j P_{L,j} (m_{g+1} - m_g) \right] \quad (32)$$

式子: G 为故障点集合; m_g 为故障节点 g 修复时间。

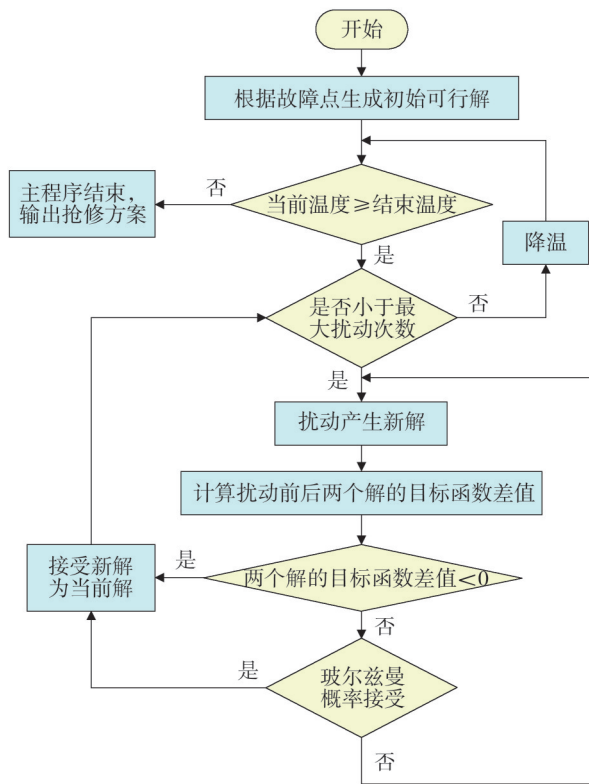


图2 模拟退火算法流程图

Fig.2 Flowchart of simulated annealing algorithm

4.3.2 故障抢修约束条件

1) 施工队约束。

为符合实际常理,单个施工队一次只能从一个故障点出发前往另一个故障点。

$$\sum_{g=1}^G \sum_{d=1}^G o_{gd} = 1 \quad (33)$$

式子: o_{gd} 表示施工队从故障点 g 移动至故障点 d , 是为 1, 否则为 0。

2) 故障抢修时间约束。

正常气象条件下的故障抢修时间由抢修小队路程时间和检修时间两部分构成,其约束可表示为

$$M_{p,h} = M_{s,h} + M_{r,h} \quad (34)$$

式中: $M_{p,h}$ 、 $M_{s,h}$ 和 $M_{r,h}$ 分别为正常气象条件下的线路 h 修复时间、抢修队伍路程时间和检修时间。

极端灾害情况下,可认为故障线路修复时间与天气强度为正相关关系,因此,极端灾害情况下故障线路修复时间可表示为

$$M_{e,h} = K_3 M_{p,h} = K_3 (M_{s,h} + M_{r,h}) \quad (35)$$

式中: $M_{e,h}$ 为极端灾害情况下的线路 h 修复时间; K_3 为极端天气影响因子,通过实验进行取值。

4.4 灾后故障抢修和配电网重构协同优化

网络重构和故障抢修都是配电网在极端灾害下提高系统复电性能的有效措施,将二者的优点结合,相互作用,协同优化。按照方法实现的时序步骤,可将流程划分为故障抢修实现和网络重构实现。在灾时网络重构后的拓扑结构基础上利用故障抢修模型得到最优故障抢修方案,完成抢修任务后对设备状态进行更新,在设备状态更新后进行网络重构实现,利用网络重构模型实现对配电网拓扑结构的更新,并检查是否还有故障线路未被修复,若仍存在故障,则重复网络重构与故障抢修协同方法。协同互动方法的实现是完成系统故障排除、节点负荷恢复的最后一环,有效提高配电网系统复电的速度,同时提升复电效率。配电网二阶段重构资源调控优化的方法流程如图3所示。

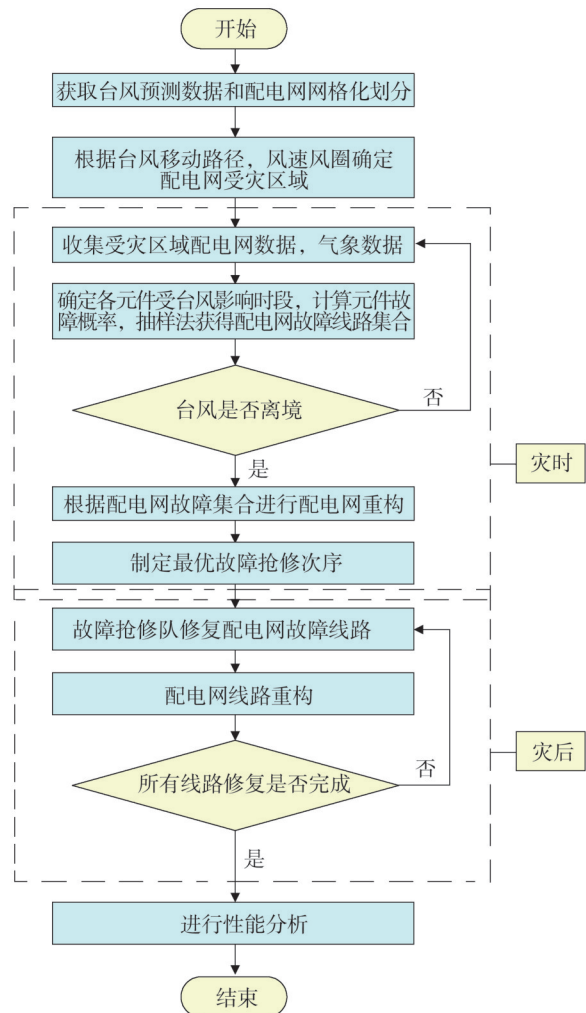


图3 配电网二阶段重构资源调控优化的方法流程图

Fig.3 Method flowchart for optimizing resource regulation and control in two-stage reconstruction of distribution network

5 算例

选用 IEEE 33 配电网作为算例。在 IEEE 33 配电网中,加入功率恒定的分布式电源和可控负荷,并将其划分为 27 个区域,图 4 展示了配电网的拓扑结构以及区域的详细划分。算例中 DG 种类只考虑受台风影响

较小的风力发电且假设其功率恒定。各负荷权重等级和可控负荷的划分列于表 1。配电网系统与台风影响范围的地理拓扑关系如图 5 所示,其中,黑色椭圆范围为电力系统所处位置;根据气象部门提供的历史台风数据,设定台风路径,如图中虚线所示;红色圆圈为台风十级风圈,在其范围内将遭受强风侵袭。

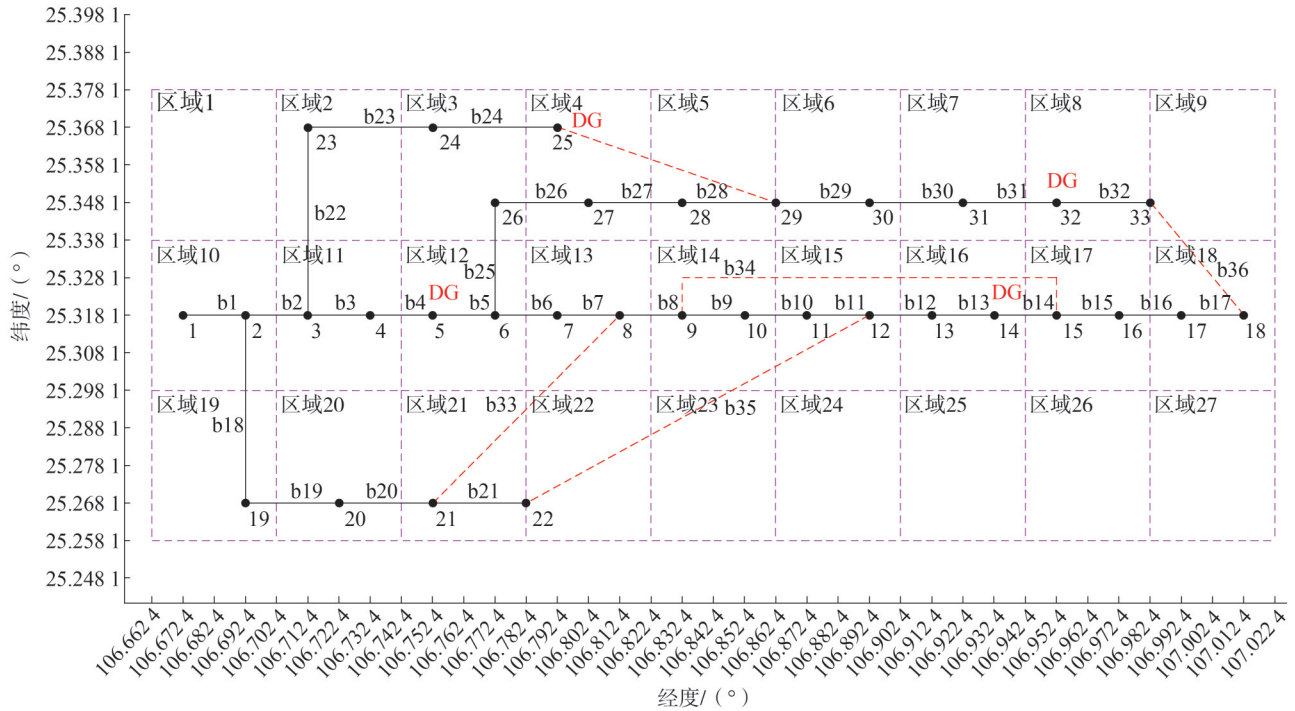


图 4 配电网拓扑结构及区域划分图

Fig.4 Topological structure and regional division diagram of distribution network

表 1 节点的负荷等级和可控负荷划分

Table 1 Load level and controllable load division of nodes

一级负荷	二级负荷	三级负荷	可控负荷	不可控负荷	
	4, 6, 12,	1, 2, 5, 7, 8,		1, 2, 4, 5, 6, 7, 9, 10,	
	3, 10, 15,	9, 13, 14,		11, 12, 13, 14, 16, 17,	
	11, 24,	19, 21, 16, 17, 20,	3, 8, 15,	18, 19, 20, 21, 22, 23,	
	31	22, 23, 25, 26, 27,	27, 33	24, 25, 26, 28, 29, 30,	
		30, 33		28, 29, 32	31, 32

为验证本文提出的故障供电恢复策略方法的可行性与最优性,在相同的故障场景下,采用 3 种不同的方案来求解供电恢复策略。

方案一:使用传统的配电网故障修复策略,仅考虑在灾后进行故障抢修。

方案二:灾中时考虑配电网重构方法以恢复关

键负荷的电力供应,灾后时仍以传统的配电网故障修复策略对故障线路进行抢修。

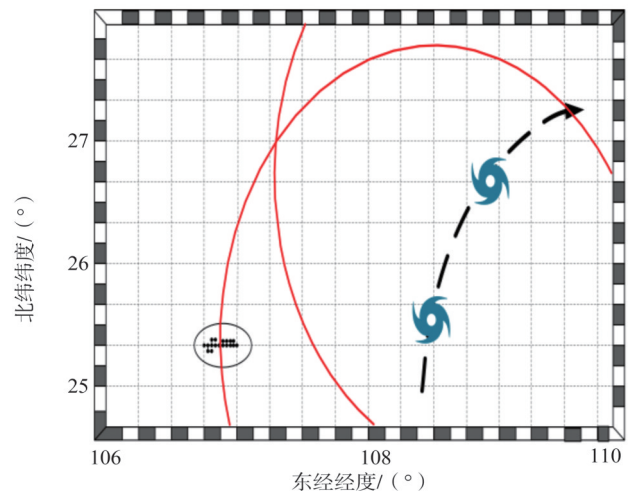


图 5 电力系统地理拓扑图

Fig.5 Geographic topology diagram of power system

方案三:灾中时考虑配电网重构方法以恢复关键负荷的电力供应,灾后时采取本文所述方法,将故障抢修与配电网重构协同优化进行灾后复电。

假设配电网在早上 10:00 遭受台风侵袭,配电网多段线路都出现断线故障(线路 b11,b12,b13,b16,b19,b23,b24,b27,b28,b34,b35)。灾害持续时间为 5h。在台风灾害离境后,方案二和方案三按策略对配电网系统立刻采取灾时配电网重构措施,尽可能地恢

复重要负荷供电。通过闭合联络线路 b33、b36、b37,完成灾时重构,恢复节点 18、节点 20、节点 21、节点 22、节点 29、节点 30 和节点 33 的部分负荷供电,同时由于 DG 参与负荷供电恢复,故增大了对 DG 的功率消纳,提高 DG 的利用率,减少弃风量。灾中适应阶段对配电网进行重构后的拓扑结构如图 6 所示,各 DG 出力量和消纳量如图 7 所示。

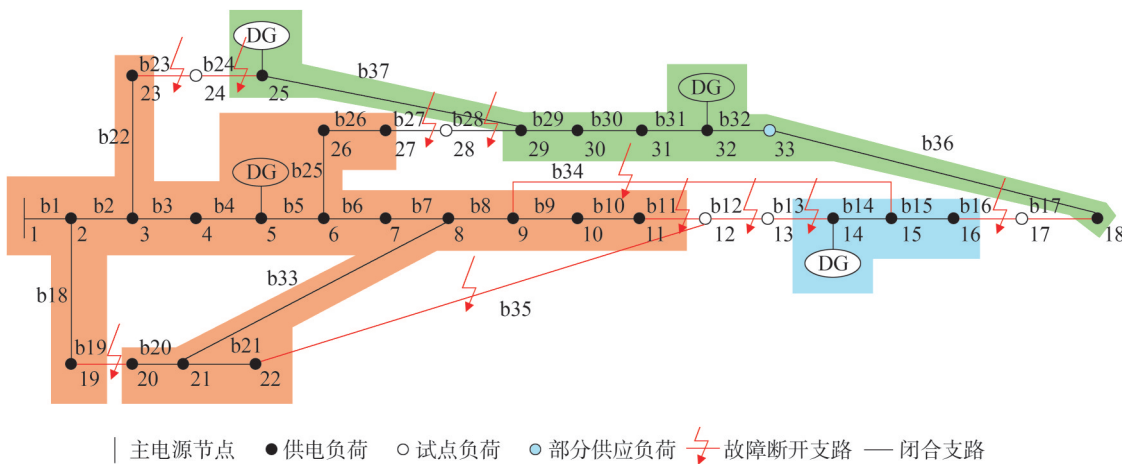


图6 配电网灾时重构拓扑结构图

Fig.6 Topological structure diagram for distribution network reconstruction during disasters

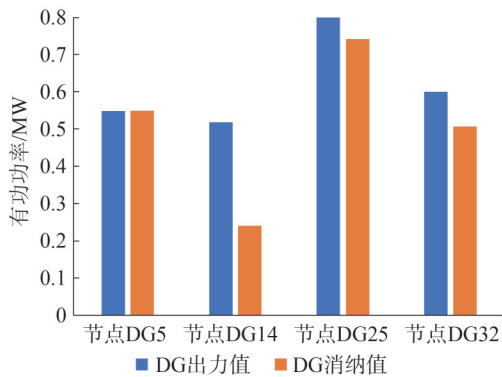


图7 各DG出力值和消纳值

Fig.7 Output and absorption values of each DG

在台风离境后 2 h 后,3 个方案均进行配电网灾后抢修阶段,本文讨论的 3 种方案均考虑只有一支抢修队队伍的情况,并设置抢修队从节点 16 处开始出发。由于方案一和方案二仅将修复的故障线路进行闭合操作,不进行整体的配电网重构操作,故优先考虑修复配电网主要线路。方案二是在重构后的拓扑结构基础上进行抢修并闭合线路,故会出现短时间的环网,由于处于灾后抢修阶段,允许环网短暂无

现。而方案三根据得到的最优故障抢修顺序对配电网故障线路进行抢修后,协同配电网重构策略,允许其对故障的联络线进行修复,结合配电网重构以最快的速度恢复所有负荷的正常供电,配电网也不会出现环网问题。方案三最优故障抢修及重构协同策略结果如表 2 所示。

表2 最优故障抢修顺序及重构过程
Table 2 Optimal fault repair sequence and reconstruction process

故障线路	故障	故障线路	故障	故障线路	故障
修复顺序	线路	修复顺序	线路	修复顺序	线路
1	线路 23	5	线路 35	9	线路 28
2	线路 24	6	线路 13	10	线路 16
3	线路 11	7	线路 27	11	线路 12
4	线路 34	8	线路 19		

为分析比较灾害下配电网恢复供电策略优越性,绘制配电网系统 3 个复电策略方案的配电网性能随故障时间变化的曲线如图 8 所示,系统复电指

标的结果如表 3 所示。

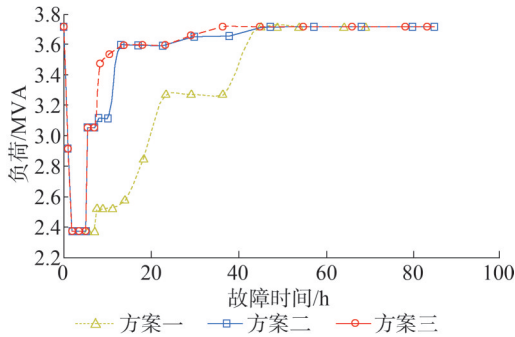


图8 各方案故障时间内系统负荷曲线图

Fig.8 System load curve during the failure time of each scheme

表3 配电网复电策略比较

Table 3 Comparison of power restoration strategies for distribution network

方案	所有负荷恢复时间/h	负荷恢复速度/(MW/h)	负荷缺供率/%
一	39.45	0.033 97	86.744 6
二	52.15	0.025 69	95.369 3
三	31.3	0.042 81	96.003 7

由图 7 曲线可以看出,在灾时降负荷运行阶段,对配电网进行网络重构,可以将受灾区域的重要负荷节点转移到非受灾区域或利用配电网中的分布式电源对重要负荷节点进行供电,不仅可以提高配电网的供电稳定性,更提高了风电消纳,减少弃风率。与方案一相较,方案二和方案三在故障恢复方面展现出更高的经济性,这一特点恰好满足了实现社会经济总价值最大化的需求。

由图 7 曲线和表 3 可以看出,在灾后故障抢修阶段,相比于方案一和方案二,方案三的负荷恢复时间最短,负荷恢复速度最快,负荷缺供率值也最大。可以在最短的时间内恢复配电网对所有负荷节点的供电,减少缺供电造成的损失。同时,方案三较方案二更加灵活,不会出现短时间的环网,从而提升了电力供应的稳定性和系统运营的经济性。

6 结束语

通过灾中阶段配电网重构和灾后最优故障抢修次

序方案,结合配电网动态重构,通过配电网在抢修过程中的网架重构进一步优化抢修策略,从而进一步完善了配电网的故障恢复机制。特别是在配电网遭遇强台风等极端天气导致多条线路同时断裂时,该策略能显著提高故障恢复的速度。此外,这一优化策略还确保了在灾害期间降负荷运行以及灾后故障抢修过程中,能够最大化地恢复负荷供电。

在未来的研究中,关于提升极端灾害下配电网故障恢复策略的效果,可以考虑融入应急供电车的调配策略,此外还可以深入探讨分布式电源在极端灾害下出力的不稳定性和多种不同类型的分布式电源在极端灾害下的能源互补特性。

参考文献

- [1] 刘柏私,谢开贵,马春雷,等.复杂中压配电网的可靠性评估分块算法[J].中国电机工程学报,2005,25(4):40-45.
LIU Bosi,XIE Kaigui,MA Chunlei,et al.Section algorithm of reliability evaluation for complex medium voltage electrical distribution networks[J].Proceedings of the CSEE,2005,25(4):40-45.
- [2] 王鹏飞.基于综合考量的配电网供电可靠性评估[J].电气开关,2024,62(2):80-81.
WANG Pengfei.Power supply reliability evaluation based on multi-level distribution network [J].Electric Switchgear, 2024, 62 (2) : 80-81.
- [3] 薛禹胜,肖世杰.综合防御高风险的小概率事件:对日本相继天灾引发大停电及核泄漏事件的思考[J].电力系统自动化,2011,35(8):1-11.
XUE Yusheng, XIAO Shijie. Comprehensively defending high risk events with low probability [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(8) : 1-11.
- [4] 李家钰,秦文萍,景祥,等.台风灾害下考虑连锁故障的电力系统弹性评估[J].电力系统及其自动化学报,2023,35(1):14-22.
LI Jiayu, QIN Wenping, JING Xiang, et al. Power system resilience assessment considering cascading failure under typhoon disaster [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(1) : 14-22.
- [5] 李扬,赵艳雷,周国良,等.台风灾害下配电网脆弱线路的多角度辨识方法[J].电子测量技术,2021,44(15):15-22.
LI Yang, ZHAO Yanlei, ZHOU Guoliang, et al. Multi - angle identification method of vulnerable lines in distribution network under typhoon disaster [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(15) : 15-22.
- [6] 谢宇峥,章德,杨祺铭,等.台风灾害下考虑修复不确定性和V2G的弹性城市电网动态供电恢复方法[J].电网与清洁能源,2024,40(6):107-114.
XIE Yuzheng, ZHANG De, YANG Qiming, et al. A dynamic power supply restoration method for resilient urban power grids considering repair uncertainty and V2G under typhoon disaster [J].

- Power System and Clean Energy, 2024, 40(6):107-114.
- [7] LEI S B, WANG J H, CHEN C, et al. Mobile emergency generator pre-positioning and real-time allocation for resilient response to natural disasters [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(3):2030-2041.
- [8] 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 Yushan, DENG Hui, WANG Xu, 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.
- [9] 李明昊, 杨祺铭, 李更丰, 等. 台风场景下基于多种分布式资源协同的弹性配电网两阶段供电恢复策略[J]. 高电压技术, 2024, 50(1):93-104. LI Minghao, YANG Qiming, LI Gengfeng, et al. Two-stage power supply restoration strategy of resilient distribution network based on coordination of multiple distributed resources in typhoon scenario [J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1):93-104.
- [10] 邢晓敏, 潘成琳, 李贻涛. 考虑孤岛与重构的配电网故障双层恢复策略[J]. 吉林电力, 2022, 50(5):4-8. XING Xiaomin, PAN Chenglin, LI Yitao. A bi-level fault recovery strategy for distribution networks considering islanding and reconfiguration [J]. Jilin Electric Power, 2022, 50(5):4-8.
- [11] 杨祺铭, 李更丰, 别朝红, 等. 台风灾害下基于V2G的城市配电网弹性提升策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(12):130-139. YANG Qiming, LI Gengfeng, BIE Zhaohong, et al. Vehicle-to-grid based resilience promotion strategy for urban distribution network under typhoon disaster [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(12):130-139.
- [12] 郑幸. 基于蒙特卡洛法的配电网可靠性评估[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [13] 杨丽君, 魏玲玲, 卢志刚, 等. 考虑可中断负荷的配电网分区动态故障恢复[J]. 电工电能新技术, 2016, 35(8):73-80. YANG Lijun, WEI Lingling, LU Zhigang, et al. Fault partition dynamic recovery strategy for distribution network considering interruptible loads [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2016, 35(8):73-80.
- [14] 李顺昕, 张姚, 岳云力, 等. 基于重构有效性和最优网架选择的配电网动态重构研究[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(7):30-37. LI Shunxin, ZHANG Yao, YUE Yunli, et al. Research on dynamic reconfiguration of distribution network based on reconstruction effectiveness and optimal network selection [J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(7):30-37.
- [15] 陈广宇, 柳慧琴, 邱文祥, 等. 基于适应度的配电网多故障抢修任务分配策略[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(11):67-74. CHEN Guangyu, LIU Huiqin, QIU Wenxiang, et al. Fitness-based task allocation strategy for multi-fault repair of distribution system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(11):67-74.
- [16] 李明轩, 魏韡, 许寅, 等. 基于预演算法的灾后配电网应急抢修决策优化[J]. 电力建设, 2023, 44(12):85-94. LI Mingxuan, WEI (WeiXue), XU Yin, et al. Rollout algorithm-based post-disaster distribution system emergency repair optimization [J]. Electric Power Construction, 2023, 44(12):85-94.
- [17] 胡邦辉, 谭言科, 王举. 热带气旋海面最大风速半径的计算[J]. 应用气象学报, 2004, 15(4):427-435. HU Banghui, TAN Yanke, WANG Ju. Calculation of maximum wind velocity radius of tropical cyclone on sea surface [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 2004, 15(4):427-435.
- [18] 王冬辉. 极端台风下电网弹性评估时域仿真方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.
- [19] 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. 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.
- [20] 王文媛. 基于弹性理论和复杂网络理论的电网关键环节辨识方法[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
- [21] 兰颖. 考虑台风影响的配电网可靠性评估和规划[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- [22] 刘健辰, 刘山林. 基于二阶锥松弛和Big-M法的配电网分布式电源优化配置[J]. 电网技术, 2018, 42(8):2604-2611. LIU Jianchen, LIU Shanlin. Optimal distributed generation allocation in distribution network based on second order conic relaxation and big-M method [J]. Power System Technology, 2018, 42(8):2604-2611.
- [23] 刘一兵, 吴文传, 张伯明, 等. 基于混合整数二阶锥规划的主动配电网有功-无功协调多时段优化运行[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16):2575-2583. LIU Yibing, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. A mixed integer second-order cone programming based active and reactive power coordinated multi-period optimization for active distribution network [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16):2575-2583.
- [24] 刘莉, 陈学锋, 翟登辉. 智能配电网故障恢复的现状与展望[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(13):148-154. LIU Li, CHEN Xuefeng, ZHAI Denghui. Status and prospect of service restoration in smart distribution network [J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(13):148-154.
- [25] 张滢. 调度优化配网故障抢修方法分析研究[D]. 厦门: 厦门理工学院, 2017.
- 收稿日期: 2024-06-08
修回日期: 2024-10-12
作者简介:
吴龙腾(1982), 男, 高级工程师, 从事电网运行调度控制相关工作;
郭乾(1986), 男, 硕士, 工程师, 从事电网运行调度控制相关工作;
吴杰康(1965), 通信作者(wujiekang@163.com), 男, 教授, 工学博士, 博士生导师, 研究方向为电力系统运行与控制等;
陈冠熹(2001), 男, 硕士在读, 研究方向为电力系统规划与运行等。
- (责任编辑 姜婷婷)