

台风及暴雨灾害下配电网抗灾及复电优化策略

吴龙腾¹, 孟子杰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, 广州 510000; 2. 广东工业大学自动化学院, 广州 510006)

摘要: 我国沿海城市频繁遭受超强台风侵袭, 导致配电网故障频发和重大停电经济损失。为增强配电网的抗灾能力及供电可靠性, 提出了一种基于台风预测数据的优化策略, 模拟台风引发的强风和暴雨灾害, 并采用蒙特卡洛抽样法对线路和负荷节点的故障进行模拟。策略优化分配分布式电源和有限的主网供电资源, 优先保障重要负荷供电, 制定最优切负荷方案, 实现灾时资源灵活调整和负荷优化。灾后通过配电网重构和应急电源车调度, 以降低缺供电经济损失和提升可再生能源利用率为目标, 优化线路开关状态和应急电源车的接入位置。IEEE 33 配电系统仿真结果表明, 该策略在台风期间有效减少停电损失, 并在灾后扩大复电区域, 提升复电性能和应急响应能力。所提策略为台风灾害下的最优切负荷和灾后保供电提供创新方案, 有效增强了城市配电网在面对极端灾害时的抗灾能力和供电可靠性。

关键词: 台风灾害; 暴雨灾害; 配电网; 抗灾; 复电; 柔性移动资源; 优化调控

Optimization Strategy of Disaster Resistance and Electricity Restoration in Distribution Network Under Typhoon and Rainstorm Disasters

WU Longteng¹, MENG Zijie¹, WU Jiekang², CHEN Guanxi²

(1. Power Dispatching and Control Center of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510000, China; 2. School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Coastal cities in China frequently suffer from super typhoon invasions, leading to frequent distribution network failures and significant economic losses due to power outages. To enhance the disaster resilience and power supply reliability of the distribution network, an optimization strategy is proposed based on typhoon forecast data, simulating strong winds and heavy rainfall disasters caused by typhoons, and using Monte Carlo sampling to simulate faults in lines and load nodes. The strategy optimizes the allocation of distributed power sources and limited main grid power resources, prioritizes the power supply to critical loads, and formulates an optimal load shedding scheme to achieve flexible adjustment of resources and load optimization during disasters. Post-disaster, the strategy utilizes distribution network reconfiguration and emergency power vehicle dispatch to reduce economic losses due to power shortages and enhance the utilization rate of renewable energy, optimizing line switch states and the access locations of emergency power vehicles. Simulation analysis is conducted on the IEEE 33 distribution system indicate that this strategy effectively reduces power outage losses during typhoons and expands the power restoration area post-disaster, enhancing restoration performance and emergency response capabilities. The proposed strategy provides an innovative solution for optimal load shedding during typhoon disasters and post-disaster power supply assurance, effectively enhancing the disaster resilience and power supply reliability of urban distribution networks facing extreme disasters.

Key words: typhoon disasters; rainstorm disaster; distribution network; disaster resistance; electricity restoration; flexible mobile resources; optimize regulation

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金区域联合基金项目—粤港澳研究团队项目(2020B1515130001); 中国南方电网有限责任公司科技项目(036000KK52222036(GDKJXM20222392))。

Foundation item: Supported by the Guangdong Province Basic and Applied Basic Research Fund Regional Joint Fund Project (2020B1515130001); the Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd.(036000KK52222036(GDKJXM20222392)).

0 引言

我国是台风登陆最频繁的国家之一,从1949到2021年,共有563个台风登陆我国,年均约7.71个。近年来台风年均登陆数量有减少的趋势,但在登陆的台风中,低强度台风的数量在减少,而高强度台风的数量却有所增加^[1]。高强度台风的侵袭过境时带来的强风和暴雨极易对电力系统设备造成严重的干扰,并产生故障。由于台风天气的持续影响,将会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^[2]。以2015年的强台风“彩虹”为例,该台风在中国的广东地区登陆,导致超过1万座电力杆塔倒塌,1000多条10 kV或更高电压级别的输电和配电线路发生跳闸,以及447万用户的电力中断^[3];2018年的超强台风“山竹”在广东江门海口登陆后,继续向北转向广西玉林,造成广西电网遭受严重损害,35 kV及以上电压等级设备跳闸次数高达42次,35 kV变电站全站失压3座,10 kV及以下电压等级的杆塔受损782基。配变受损49台^[4]。2019年的超强台风“利奇马”对多个省份的电网造成严重影响,此次台风造成了72座35 kV以上变电站受损、4649条10 kV及以上线路发生故障,导致759.17万用户停电^[5]。

目前,国内外已有学者开展了配电网系统抵御台风灾害和配电网系统遭受台风灾害后的紧急恢复策略的研究。文献[6]提出了一个多角度的辨识模型,综合考虑气象条件、线路结构特性、设备老化程度、周边环境(如植被和地理位置)、历史故障数据等多个因素,评估配电网线路在台风中的脆弱性。文献[7]对网络脆弱性、恢复能力和风险暴露进行了综合分析,并通过加固线路、升级设备以提高抗灾能力,减少极端天气对配电网的影响。文献[8]在灾害发生前提前确定移动储能车的具体部署位置,并在灾害发生后进行协同调度,以提高应急响应效率,成功地减少了配电网的总停电负荷量和储能车所需的行驶时间。文献[9-10]通过优化灾后故障抢修队伍路径,以获得最优抢修策略,在故障抢修的同时结合配电网重构策略有效提升配电网的复电能力。文献[11-12]考虑了灾前电动汽车的调度和灾后移动储能紧急救援车和配电网重构策略,提出了灾后阶段以紧急功率支撑和负荷快速恢复两个过程的恢复策略。文献[13-14]提出了一种

结合分布式电源与联络线路的负荷恢复模型,通过配电网重构技术进行新孤岛划分,以提升配电网的负荷恢复效率。但仅依靠配电网重构技术,负荷恢复能力有限。

在台风灾害下除了考虑台风带来的强风影响外,台风带来的强暴雨影响同样不可忽视。文献[15]构建一套风雨联合的灾害模型,结合雨滴直径大小和台风风速并通过灾害机理公式得到暴雨强风下导线承受的压力,由线路承受的压力推算出配电网中线路故障率。文献[16]通过气象台的数据,预测台风和暴雨在时间上的变化趋势,再结合配电网所处的环境及地形地貌特征,进行地理特征值修正。从而准确的评估极端台风天气对输电系统的影响,包括直接影响和引发山洪、滑坡、泥石流等次生灾害间接造成输电线路断裂、塔杆倒塌、闪络等故障的间接影响。以上文献仅考虑了暴雨对配电网线路的影响,而在城市配电网中,暴雨对线路的故障影响明显小于强风对线路的影响。文献[17]对台风和水浸灾害对配电网的主要影响进行分析,包括线路倒塌、变压器损坏、设备短路和配电设施被淹等问题通过对历史灾害事件的数据分析,确定了配电网的关键脆弱性和风险点,并在灾后阶段快速调度维修队伍、备份设备资源和制定优先恢复策略,以减少停电时间和恢复成本。虽然该文献对台风和水浸灾害进行了较为详细的分析,但对灾害过程中的动态变化(如风速变化、水位上涨等)的实时应对策略阐述较少,可能影响应急响应的全面性。

综上所述,本文提出了一种全面反映台风引发的强风和暴雨灾害对电网元件故障率影响的时空分析框架,提出强风对配电网线路造成损坏,以及暴雨对配电网变压器等配电设备造成损坏的故障模拟方法,并结合台风移动过程的动态变化,进行分时分场景的灾害风险应对策略。基于台风预测数据,采用蒙特卡洛抽样法对线路故障模型和配电设备故障模型进行抽样模拟,得到台风侵袭过程的配电网故障集合。考虑主网对配电网供电不足的极端情况和配电网内分布式电源的出力,根据配电网中不同重要程度的负荷和对可控负荷按比例供电的灵活性操作,以缺供电经济损失最小进行最优切负荷控制。台风侵袭过境后,配电网故障集合不再增加的情况下,配电网系统首先根据负荷优先级进行配电网重构,尽可能恢复重要负荷供电。同时考虑到配

电网重构对负荷恢复能力有限,在配电网重构的基础上搭配移动应急电源车的最优调配,移动应急电源车调配的策略同样考虑负荷优先级,优先保障对重要负荷进行恢复供电。同时,结合系统中的分布式电源,对配电网重构后的孤岛进行扩大,在尽可能多地恢复负荷供电的同时使得分布式电源出力消纳最大。从而提高配电网系统应对极端灾害的能力,减少灾害带来的经济损失。

1 台风灾害中的强风和强降雨模型

1.1 台风的强风模型

台风可以模拟成一个圆形模型,在最大风速半径处风速为最大,向台风眼内和台风范围外递减。模拟时因其不对称性,故采用与距离成反比的移动风场模型叠加上静止的圆形环流风场模型来模拟完整的台风模型。本文采用了宫崎正卫移动风场模型和改进型 Rankine 环流风速模型进行叠加^[18]。

1.1.1 宫崎正卫移动风速模型

宫崎正卫的移动风速 V_d 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,具体的模型如下。

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

式中: K_1 为经验系数; V_0 为台风风眼移动速度,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 为台风风场中某点与台风中心之间的距离。

距离 r 可根据台风风场中某点的经纬度坐标与台风中心的经纬度坐标 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 以及地球平均半径 R_{av} 通过式(2)计算得出。

$$r = R_{av} \arccos(\sin(y_1) \sin(y_2) + \cos(y_1) \cos(y_2) \cos(x_1 - x_2)) \quad (2)$$

式中 R_{av} 近似取 6 371 km。

1.1.2 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 $V_{\max}$ 为最大环流风速,可通过式(4)计算求得。

$$V_{r \max} = V_{\max} - V_d|_{r=R_{\max}} = V_{\max} - V_0 e^{-\frac{\pi}{K_1}} \quad (4)$$

式中 $V_{\max}$ 为台风近中心最大风速。

传统 Rankine 涡模型中,台风最大风速区域内的风速呈线性上升,导致风速变化过快;在台风外围区域和台风中心区域,风速急剧下降,随后快速趋于平稳。该模型在内外部的风速分布范围较小,与实际情况偏差较大。因此,针对传统 Rankine 模型进行了修正,加入了无量纲风速修正因子,使其模型更加符合实际情况,具体修正后的模型如(5)所示。

$$V_r = \begin{cases} \frac{r}{R_{\max}} V_{\max} \frac{1}{1 - \frac{r}{R_{\max}} + \left(\frac{r}{R_{\max}}\right)^2}, & r \in [0, R_{\max}] \\ \frac{R_{\max}}{r} V_{\max} \frac{1}{1 - \frac{R_{\max}}{r} + \left(\frac{R_{\max}}{r}\right)^2}, & r \in (R_{\max}, \infty) \end{cases} \quad (5)$$

1.1.3 台风风速模型

台风范围内某地的风速大小为该地宫崎正卫移动风场风速大小和改进型 Rankine 环流风速大小的迭加,可通过式(6)进行计算。

$$V = V_d + V_r \quad (6)$$

1.2 台风的强风模型

1.2.1 暴雨强度公式

台风在风眼内和台风范围外的区域除了会带来强风,同时还有暴雨灾害的影响。常见的暴雨模型常采用芝加哥雨型进行模拟,该模型函数以灾害历时为自变量进行雨量分配^[19]。台风侵袭时段内,台风强度变化不大的情况下,其风雨强度也保持不变,其风雨影响范围内某地的雨量强度与该地到台风风眼的距离有关。由于台风在侵袭时段内位置发生变化,台风的移动位置与灾害历时有关。且台风风雨范围内,在台风最大风速半径处往往也是最大暴雨强度处,向台风眼内和台风范围外递减。其规律曲线与芝加哥暴雨模型相似,故本文将芝加哥暴雨强度模型进行修改,获得台风范围内暴雨强度模型,以测试点到台风风眼之间的距离为自变量进行台风影响范围内的雨量分配,具体的模型如下:

$$\eta = \begin{cases} \frac{a[(R_{\max} - r)(1 - c) + b]}{[(R_{\max} - r) + b]^{(1+c)}}, & 0 \leq r \leq R_{\max} \\ \frac{a[(r - R_{\max})(1 - c) + b]}{[(r - R_{\max}) + b]^{(1+c)}}, & R_{\max} < r < \infty \end{cases} \quad (7)$$

式中 a 、 b 、 c 为暴雨强度公式参数。

1.2.2 各区域降雨量

对该地区的暴雨强度公式进行积分即可得到该地区一个时段内的降雨量大小, 具体计算公式如下所示。

$$E_w = A_w \left(\int_{r_{w,1}}^{r_{w,2}} \eta dr \right) \quad (8)$$

式中: A_w 为区域 w 的总面积; $r_{w,1}$ 为台风入境时, 区域 w 距离台风中心的距离; $r_{w,2}$ 为台风离境后, 区域 w 距离台风中心的距离。

1.2.3 各地区的地表径流量

在给定降雨量下计算区域的地表径流量 Q_w 如式(9)—(10)所示。

$$Q_w = \begin{cases} \frac{(E_w - 0.2S_w)^2}{E_w + 0.8S_w}, & 0.2S_w \leq E_w \\ 0, & E_w < 0.2S_w \end{cases} \quad (9)$$

$$S_w = \frac{25400}{\mu_w} - 254 \quad (10)$$

式中: S_w 为区域 w 最大持水量; μ_w 为区域 w 的径流曲线参数。

1.2.4 各地区的排水能力

各区域的排水能力通过区域的排水量反应, 而区域的排水量由该区域排水管网口的数量及其排水能力决定, 计算公式如下。

$$Q_{\text{pipe}, w} = u_w q_{\text{pipe}} t_{\text{pipe}} \quad (11)$$

式中: u_w 为区域 w 的排水管网口总数量; q_{pipe} 为排水管口的排水流量能力; t_{pipe} 为排水过程的持续时间。

1.2.5 各地区的积水深度

考虑到城市配电网各区域间的地势变化不大, 忽略了积水在区域间的流动。区域内积水的变化由降雨量和排水量决定。因此基于区域内的地表总流量和总排水量, 计算该区域的地表积水深度 h_w , 具体计算公式如下。

$$h_w = \frac{Q_w - Q_{\text{pipe}, w}}{A_w} \quad (12)$$

2 配电网故障模型

台风灾害侵袭期间, 配电网线路易受强风影响, 出现断线故障。此外, 台风灾害同时引发了极端暴雨灾害也会导致配电设备失效故障。

2.1 线路故障概率模型

2.1.1 区域内线路故障概率

将配电网系统按经纬度坐标划分为等边长网

格, 对其进行网格化处理。由于这些网格相对台风影响区域足够小, 因此可以假定每个网格内的台风灾害强度一致^[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, 结合配电网元件的脆弱性曲线, 来获得 t 时刻线路 g 在第 w 个网格区域中线路发生故障的概率 $p_{g, t, w}$, 具体计算公式如下。

$$p_{g, t, w} = \begin{cases} 0, & 0 < V_w < V_{re} \\ \exp \left[\frac{K_2 (V_w - V_{re})}{V_{re}} \right] - 1, & V_{re} \leq V_w \leq 2V_{re} \\ 1, & V_w > 2V_{re} \end{cases} \quad (13)$$

式中: V_w 为第 w 个网格区域内的台风风速大小; V_{re} 为配电网线路设计的最大可抵御风速; K_2 为经验系数。

2.1.2 线路总故障概率

配电网中的一条线路由多个网格内的线路串联组成, 因此一旦某条线路中的任意网格内的线路发生故障, 整条线路将退出运行^[21], 导致该线路处于故障停运状态, 因此 t 时刻线路 g 的故障概率 $p_{g, t}$ 为:

$$p_{g, t} = 1 - \prod_{w \in \Omega_g} (1 - p_{g, t, w}) \quad (14)$$

式中 Ω_g 为线路 g 所在的网格集合。

2.2 配电设备失效模型

同理, 配电网每个网格区域相对于台风强降雨范围较小。可以假设每个网格区域内暴雨过程一致, 且同一网格区域内积水深度相同。暴雨初期, 配电设备的失效故障率与正常天气下的故障率基本相同, 但随着暴雨积水的持续积累, 当配电设备所在区域的积水高度超过其设定的防涝高度时, 设备将面临较高的故障风险, 配电设备的失效故障率会以指数级别的上升。故利用指数函数进行拟合分析^[22], 建立配电设备的失效故障率 $p_{i, t}$ 为:

$$p_{i, t} = \begin{cases} 0, & h_w < h_{bw} \\ -\left\{ 1 - \exp \left[\zeta \exp \left(\gamma \frac{h_w - h_{bw}}{h_{re}} \right) \right] \right\}, & h_{bw} < h_w < (h_{re} + h_{bw}) \\ 1, & (h_{bw} + h_{re}) \leq h_w \end{cases} \quad (15)$$

式中: h_{re} 为配电站的设计防涝高度; h_{bw} 为站内高压开关柜电缆接头处离地高度; ζ 为衰减系数; γ 为阻尼系数。

由于高压开关柜设备被安装在各个节点处,因此可以假设配电网节点的故障率与该节点站内配电设备的故障率相同。

2.3 配电网系统故障场景生成

蒙特卡洛模拟是一种广泛应用的随机数生成方法,适用于解决具有随机概率特性的复杂问题,通过大量随机采样来近似求解物理系统的行为。本文采用蒙特卡洛模拟方法生成配电网故障场景,通过生成随机数与元件故障概率进行比较,以确定元件的模拟状态。

在台风侵袭期间,配电网系统中线路和配电网节点的状态通过0和1来表征其是否发生故障^[23],具体的判别式如下。

$$\begin{cases} x_{g,t} = \begin{cases} 0, & k_{g,t} < p_{g,t} \\ 1, & k_{g,t} \geq p_{g,t} \end{cases} \\ y_{i,t} = \begin{cases} 0, & k_{i,t} < p_{i,t} \\ 1, & k_{i,t} \geq p_{i,t} \end{cases} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $k_{g,t}$ 为线路 g 在第 t 个台风时段时,由蒙特卡洛模拟法随机模拟生成的随机数; $k_{i,t}$ 为节点 i 在第 t 个台风时段时,由蒙特卡洛模拟法随机模拟生成的随机数; $x_{g,t}$ 为线路 g 在第 t 个台风时段时的状态变量,其值为0表示线路故障停运,反之,表示线路正常运行。 $y_{i,t}$ 为节点 i 在第 t 个台风时段时的状态变量,其值为0表示该节点处于故障,该节点上的负荷被迫全部切除,反之,表示该节点正常运行。

2.3.1 配电网设备失效故障场景

假设配电网包含 n 条支路 m 个节点,在第 t 个台风时段中,配电网线路故障场景和负荷节点故障场景可由两个矩阵分别表示。

$$\begin{cases} \mathbf{X}_{f,t} = [x_{1,t}, x_{2,t}, \dots, x_{n,t}] \\ \mathbf{Y}_{f,t} = [y_{1,t}, y_{2,t}, \dots, y_{m,t}] \end{cases} \quad (17)$$

式中: $x_{n,t}$ 为支路 n 在第 t 个台风时段时的状态变量; $y_{i,t}$ 为节点 i 在第 t 个台风时段时的状态变量。

遍历所有的台风入侵时段后,即可得到台风侵袭全过程中故障场景的样本,该样本也可以由两个矩阵分别表示:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_f = [\mathbf{X}_{f,1}; \mathbf{X}_{f,2}; \dots; \mathbf{X}_{f,T}] \\ \mathbf{Y}_f = [\mathbf{Y}_{f,1}; \mathbf{Y}_{f,2}; \dots; \mathbf{Y}_{f,T}] \end{cases} \quad (18)$$

式中: T 为台风入侵时段数量; $\mathbf{X}_{f,T}$ 为台风 T 的故障场景。

由于十级及以上台风风圈内的风速和降雨对配电网元件影响较为明显,所以当十级台风风圈包围配电网系统时,认为台风正在侵袭配电网系统。当十级台风风圈远离配电网时,台风离境,不再对配电网系统产生影响。配电网故障场景生成流程如图1所示。

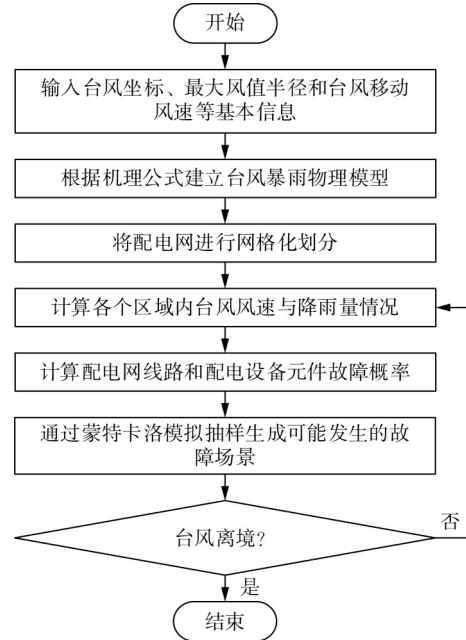


图1 故障场景生成流程图

Fig. 1 Flow chart of fault scenario generation

3 配电网复电评估指标和提升方法

3.1 配电网复电评估指标

配电网遭受台风侵袭后,系统性能需要一定的过渡时间才能恢复正常运行状态^[24-26],从台风入境时刻再到恢复正常运行阶段所经历的4个阶段如图2所示。图2中的 $L_0(t)$ 为正常运行状态下的负荷曲线, $L_1(t)$ 为传统电力系统在遭受台风灾害后的负荷曲线变化情况。而 $L_2(t)$ 为本文所提的策略,能够根据最佳切负荷策略提高电力系统在抵御吸收阶段的系统性能。同时,加入移动应急电源的动态调度与配电网重构的灾后恢复策略有效地提高电力系统在台风侵袭后的恢复性能。

3.1.1 电网经济性指标

风雨灾害期间配电网切负荷经济损失大小作为电力系统应对台风灾害的系统性能指标,具体的计算式如下。

$$H = \sum_{i=1}^n \omega_i P_{0,i} - \sum_{d=1}^o \omega_d P_{1,d} \quad (19)$$

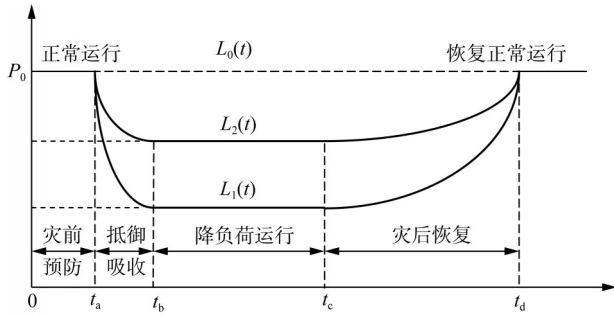


图 2 电力系统性能曲线

Fig. 2 Performance curves of power system

式中： ω_i 为节点*i*处负荷的经济权重； $P_{0,i}$ 为电力系统正常运行时节点*i*的有功功率； $P_{1,d}$ 为灾害期间电力系统节点*d*的有功功率； n 为电力系统总节点数； o 为灾害期间电力系统仍能保持供电的节点集合。可见， H 值越小，表示配电网抗灾害性能越好。

3.2 灾时最优切负荷策略

在台风侵袭过程内，考虑主网对配电网的供电受限，供电资源仅由有限的主网出力和配电网内 DG 出力组成，配电网中也存在线路和负荷节点的故障，根据配电网实时故障集合，制定最优切负荷方案，合理调配有限的供电资源，优先保障重要负荷供电。

3.2.1 目标函数

本文在台风暴雨灾害场景下考虑主网供电受限，以负荷切除成本最小为目标建立如下目标函数。

$$f = \min \left(- \sum_{\forall i \in C} c_i \omega_i P_{L,i} - \sum_{\forall j \notin C} Y_j \omega_j P_{L,j} \right) \quad (20)$$

式中： C 为可控负荷集合； c_i 为可控负荷*i*的供电比例； $P_{L,i}$ 为负荷节点*i*的有功功率需求； Y_i 为节点*i*的电力负载状态，其状态值限定为0或1，节点负载状态变量 Y_i 可接纳0作为有效值，表明系统具备在必要时可以切除该节点的负荷以维持运行的能力。

可控负荷节点在负荷无法完全恢复的情况下允许切除部分负荷，以保障系统的持续运行，其供电比例需满足以下条件。

$$0 \leq c_i \leq Y_i \quad (21)$$

3.2.2 约束条件

1) 网络潮流约束

对于配电网系统，采用 DistFlow 潮流方程，采用 Big-M 法对电压方程进行松弛，网络潮流计算公式和松弛后的电压方程如式(22)–(28)所示。

$$\sum_{j \in \Phi(i)} P_{ji} - \sum_{k \in \Psi(i)} P_{ik} - R_{ij} I_{ij}^2 = Y_i (P_{DG,i} - P_{L,i}) \quad (22)$$

$$\sum_{j \in \Phi(i)} Q_{ji} - \sum_{k \in \Psi(i)} Q_{ik} - X_{ij} I_{ij}^2 = Y_i (Q_{DG,i} - Q_{L,i}) \quad (23)$$

$$I_{ij}^2 = \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{U_i^2} \quad (24)$$

$$M_1 (\lambda_{ij} - 1) \leq U_i^2 - U_j^2 - 2(R_{ij} P_{ij} + X_{ij} Q_{ij}) + (R_{ij}^2 + X_{ij}^2) I_{ij}^2 \quad (25)$$

$$M_1 (1 - \lambda_{ij}) \geq U_i^2 - U_j^2 - 2(R_{ij} P_{ij} + X_{ij} Q_{ij}) + (R_{ij}^2 + X_{ij}^2) I_{ij}^2 \quad (26)$$

$$U_{i,\min}^2 \leq Y_i U_i^2 \leq U_{i,\max}^2 \quad (27)$$

$$0 \leq I_{ij}^2 \leq \lambda_{ij} I_{ij,\max}^2 \quad (28)$$

式中： $P_{L,i}$ 、 $Q_{L,i}$ 为负荷节点*i*的有功功率和无功功率； 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*相连的上游节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 输出的有功功率和无功功率； U_i 为负荷节点*i*的电压； I_{ij} 为线路*l_{ij}*的支路电流； M_1 为极大的数； λ_{ij} 为线路*l_{ij}*的故障情况，其值为0或1，其值为0时表示线路故障，其值为1时表示线路正常运行； $U_{i,\min}$ 、 $U_{i,\max}$ 分别为节点*i*电压下限值和上限值； $I_{ij,\max}$ 为线路*l_{ij}*电流上限值。

可控负荷节点的潮流方程式(22)和(23)中等号右边的注入功率乘数应使用 c_i 替代 Y_i 。

2) DG 出力约束

对配电网内的 DG 出力进行限制，使其出力值符合实际情况，具体公式如下所示。

$$0 \leq P_{DG,z} \leq P_{DG,\max}, (z = 1, 2, \dots, \sigma) \quad (29)$$

$$0 \leq Q_{DG,z} \leq Q_{DG,\max}, (z = 1, 2, \dots, \sigma) \quad (30)$$

式中： $P_{DG,\max}$ 为 DG 输出的有功功率上限值； $Q_{DG,\max}$ 为 DG 输出的无功功率上限值； σ 为配电网内 DG 数量总数。

3) 二阶锥约束

由于上述约束条件中含有非线性项 U_i^2 和 I_{ij}^2 ，无法直接求解，故构造新变量 v_i 、 q_{ij} 分别替代上述两个非线性项^[27]，经过松弛后转化为标准的二阶锥约束如下。

$$\left\| \begin{matrix} 2P_{ij} \\ 2Q_{ij} \\ q_{ij} - v_i \end{matrix} \right\|_2 \leq q_{ij} + v_i \quad (31)$$

3.3 灾后移动应急电源和配电网重构协同调度

网络重构和移动应急电源的动态调度是配电网在台风灾害下提高复电性能的两种有效措施^[28-29]。将这两种方法结合,通过相互作用和协同优化,可以进一步增强系统的复电能力。在灾害发生时,首先在切负荷的配电网系统模型上进行网络重构,并根据重构后网络的正常运行条件,安排移动应急电源的动态调度,形成新的孤岛运行结构,扩大孤岛的复电范围,实现最小化切负荷经济损失和最大化可再生能源利用率。

3.3.1 目标函数

本文提出的灾后策略主要目标是 minimized 灾后阶段的切负荷经济损失。此外,在重构过程中,还需优化其他目标函数,包括最小化开关操作次数、降低重构后网络损耗,以及尽量减少重构后各节点的电压偏移。

1) 切负荷经济损失最小,具体计算公式如下。

$$f_1 = \min \left(\sum_z (P_{DG,z,\max} - P_{DG,z}) - \sum_{\forall i \in C} c_i \omega_i P_{L,i} - \sum_{\forall j \notin C} Y_j \omega_j P_{L,j} \right) \quad (32)$$

2) 开关操作次数最小

避免线路开关操作过多导致设备老化甚至损坏,增加成本,具体计算公式如下。

$$f_2 = \min \left(\sum_{\forall l_{ij} \in e} \left[O_{ij(0)}(1 - O_{ij}) + O_{ij}(1 - O_{ij(0)}) \right] \right) \quad (33)$$

式中: $O_{ij(0)}$ 、 O_{ij} 分别为线路 l_{ij} 初始运行状态和当前运行状态,其取值为1时,表示该线路闭合,处于正常运行状态,反之表示该线路断开; e 为网络中所有支路的集合。

3) 网络损耗最小

选择最优的重构策略,使得重构后的网络损耗最小,减少不必要的经济损失,具体计算公式如下。

$$f_3 = \min \left(\sum_{\forall l_{ij} \in e_1} R_{ij} I_{ij}^2 \right) \quad (34)$$

式中 e_1 为网络中所有闭合支路的集合。

4) 电压偏移量最小

选择最优的重构策略,使得重构后的网络能供电的节点的电压质量满足要求,具体计算公式如下。

$$f_4 = \min (\sum |U - U_i|) \quad (35)$$

式中 U 为基准电压。

最后,对上述目标函数进行归一化处理,以构建综合目标函数。归一化后的总目标函数式如下。

$$f = \sum_{i=1}^4 \theta_i \frac{f_i}{f_i^*} \quad (36)$$

式中: θ_i 为第 i 个目标函数的权重值; f_i^* 为第 i 个目标函数的最优值。

3.3.2 约束条件

1) 移动应急电源数量约束

移动应急电源总数量是固定的,故在灾后阶段能调动的移动应急电源数量不能超过移动应急电源的总数,具体计算公式如下。

$$\sum_i^n \tau_i \leq \alpha \quad (37)$$

式中: τ_i 为连接节点 i 的移动应急电源数量; α 为移动应急电源总数量。

2) 移动应急电源连接状态约束

每个移动应急电源在最多只能接入一个节点,具体计算公式如下:

$$\sum_i^n \beta_{i,s} \leq 1, (s = 1, 2, \dots, \alpha) \quad (38)$$

式中 $\beta_{i,s}$ 为第 s 个移动应急电源与第 i 个节点的连接状态,其值为1时,表示移动应急电源已经连接节点。

3) 移动应急电源运行约束

对移动应急电源出力进行限制,使其出力值符合实际情况,具体计算公式如下。

$$0 \leq P_{EPS} \leq P_{EPS,\max} \quad (39)$$

$$0 \leq Q_{EPS} \leq Q_{EPS,\max} \quad (40)$$

$$P_{EPS}^2 + Q_{EPS}^2 \leq S_{EPS,\max}^2 \quad (41)$$

式中 $P_{EPS,\max}$ 、 $Q_{EPS,\max}$ 、 $S_{EPS,\max}$ 分别为移动应急电源输出的有功功率上限值、无功功率上限值和容量上限值。

4) 网络潮流约束

对于网络潮流约束,由于加入了移动应急电源,故潮流约束式(22)~(23)应修改为:

$$\sum_{j \in \Phi(i)} P_{ji} - \sum_{k \in \Psi(i)} P_{ik} - R_{ij} I_{ji}^2 = Y_i (P_{DG,i} + P_{EPS,i} - P_{L,i}) \quad (42)$$

$$\sum_{j \in \Phi(i)} Q_{ji} - \sum_{k \in \Psi(i)} Q_{ik} - X_{ji} I_{ji}^2 = Y_i (Q_{DG,i} + Q_{EPS,i} - Q_{L,i}) \quad (43)$$

约束条件除了上述式(37)~(43)外还包括式(24)~(31)。

完整的恢复策略流程如图 3 所示。

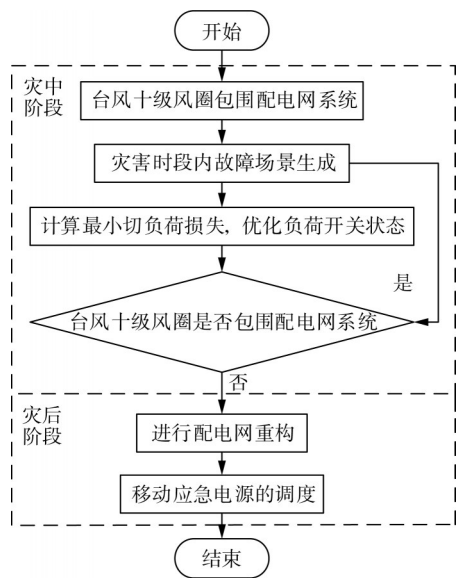


图 3 配电网二阶段重构资源调控优化的方法流程图
Fig. 3 Flowchart for optimizing resource regulation and control method in two-stage reconstruction of distribution networks

4 算例

4.1 仿真算例

本算例选用 IEEE 33 配电网模型，加入分布式电源和可控负荷，并将其划分为 27 个区域，配电网拓扑结构及区域划分情况见图 4。算例中分布式电源种类只考虑受台风影响较小的风力发电且假设其发

电功率恒定。各负荷等级权重参数列于表 1 中，各负荷失电经济损失指标列于表 2。本算例在 MATLAB 平台上使用 CPLEX 13.0 求解器进行求解。

表 1 系统中节点的负荷等级与权重

Tab. 1 Load level and weight of nodes in the system	
负荷	负荷节点
一级负荷	3, 10, 11, 24, 31
二级负荷	4, 6, 12, 15, 18, 19, 21, 22, 23, 30, 33
三级负荷	1, 2, 5, 7, 8, 9, 13, 14, 16, 17, 20, 25, 26, 27, 28, 29, 32
可控负荷	3, 8, 15, 27, 33
不可控负荷	1, 2, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 28, 29, 30, 31, 32

表 2 各等级负荷失电指标

Tab. 2 Power loss indicators for various levels of loads	
负荷	$\omega/(\text{元} \cdot \text{kWh}^{-1})$
一级负荷	100
二级负荷	10
三级负荷	1

表 3 给出了台风入侵配电网系统的 7 个场景时的相关台风信息，各场景之间的时间跨度为 30 min，并假设降雨的延展区域与台风所形成的风场范围保持一致。

设配电网各区域的径流系数为普通城市径流系数 $K_w=94$ ，各区域采用的市政建设工业排水等广泛

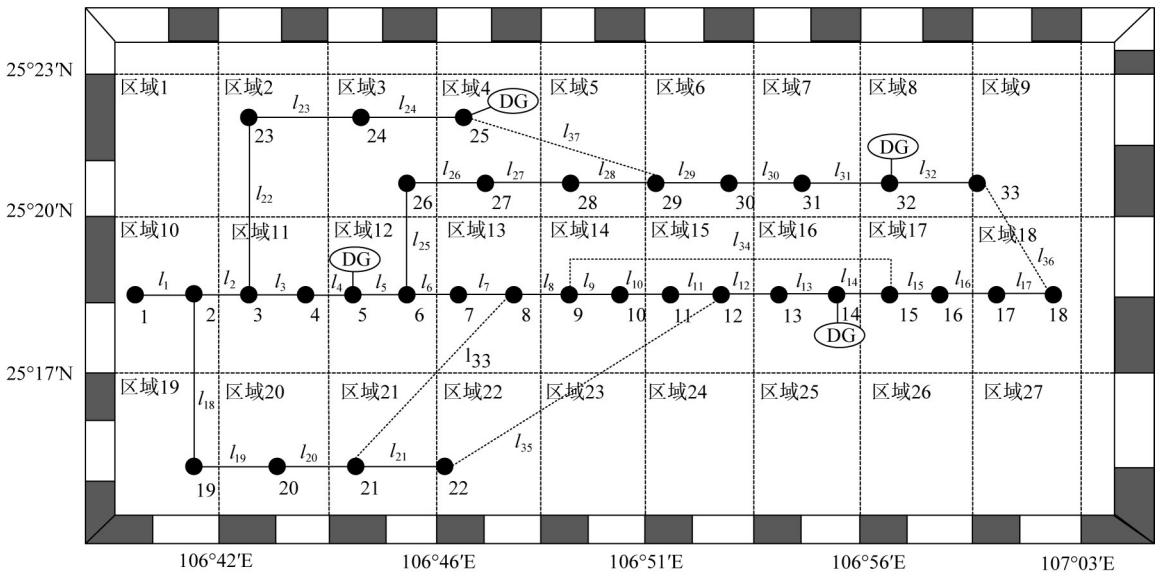


图 4 配电网拓扑结构及地理区域划分图
Fig. 4 Topological structure and geographical region division diagram of distribution network

表 3 不同场景下的台风参数

Tab. 3 Parameters of typhoon under five scenarios

台风 侵袭 场景	具体 时间	台风中心位置	台风中 心最大 风速 /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	最大风 速半径/ km	十级风 圈半径/ km	台风中 心移动 速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
1	10:00	(108.482 3 E, 25.466 3 N)	38	101	202	5.55
2	10:30	(108.411 7 E, 25.569 9 N)	38	100	201	5.55
3	11:00	(108.375 6 E, 25.664 5 N)	38	100	200	5.55
4	11:30	(108.255 6 E, 25.709 9 N)	38	101	200	5.55
5	12:00	(108.368 6 E, 25.754 5 N)	38	100	200	5.55
6	12:30	(108.465 6 E, 25.866 3 N)	38	99	199	5.55
7	13:00	(108.588 6 E, 26.066 3 N)	38	100	199	5.55

采用的管径为 300 mm 的 HDPE 双壁波纹排水管, 其排水能力达到 98.77 L/h。表 4 给出各区域的排水管口的数量。

表 4 各区域的排水管口的数量

Tab. 4 Numbers of drainage outlets in each region

区域	排水管口的数量	区域	排水管口的数量	区域	排水管口的数量
1	24 500	10	24 500	19	21 000
2	20 000	11	20 000	20	21 000
3	20 000	12	24 500	21	21 000
4	24 500	13	21 000	22	24 500
5	21 000	14	22 000	23	24 500
6	22 000	15	22 000	24	24 500
7	22 000	16	22 500	25	24 500
8	24 500	17	23 000	26	24 500
9	23 000	18	23 000	27	24 500

在台风入侵配电网时段内, 配电网各区域的积水高度变化曲线如图 5 所示。初始时刻, 台风登陆并快速逼近配电网系统带来短时超强降雨使得各区域内的积水深度在短时间内快速升高。随后, 台风逐渐远离配电网系统, 降雨强度下降, 使得积水深度略有下降。在后续台风影响配电网系统的时间内, 由于台风暴雨的强度仍较高且持续时间较长导致各区域的积水深度开始逐渐升高, 并最终达到最大值。

设算例中, 配电网系统内的线路按我国 10 kV

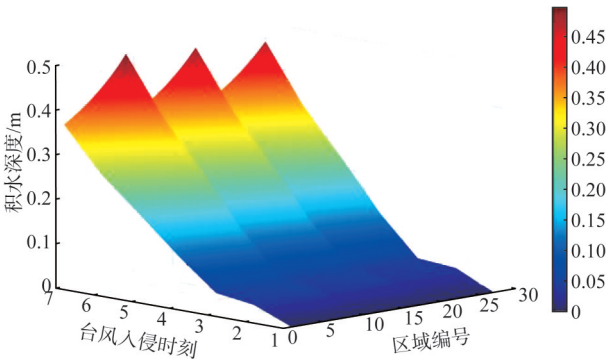


图 5 台风侵袭时各区域的积水深度

Fig. 5 Depth of accumulated water in various regions during typhoon period

配电线路的设计标准, 最大可承受风速为 25 m/s。各节点均安装有高压开关柜设备, 节点的防涝高度一般设置为 0.2~0.5 m, 站内高压开关柜电缆接头的对地标高为 0.3 m。根据各区域的风速和积水深度, 可以计算得到元件故障率曲线。在台风侵袭的 5 h 内, 37 条线路因强风引发的故障率如图 6 所示。当台风中心由场景 1 移至场景 2 时, 配电网承受的风场强度逐渐增强, 线路故障率随之逐渐变大; 随着台风中心从场景 2 向场景 5 逐步移动, 台风逐渐远离配电网, 导致风场强度逐渐减弱, 因而线路故障率随之降低。台风侵袭过程中, 33 个负荷节点因水浸引发的故障率如图 7 所示。由图 7 可以看出, 负荷节点的故障率与所在区域的积水深度呈明显的正相关关系。随着降雨持续和有效降雨量的增加, 各区域积水深度不断加深, 导致负荷节点的故障率不断上升。

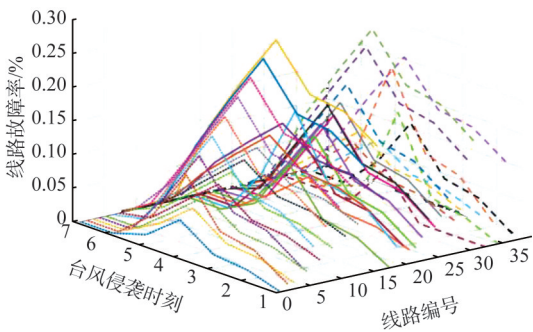


图 6 台风侵袭时各线路的故障率

Fig. 6 Failure rates of each line during typhoon period

4.2 结果分析

1.1.9 灾时阶段

根据配电网系统各线路和各节点的故障率曲

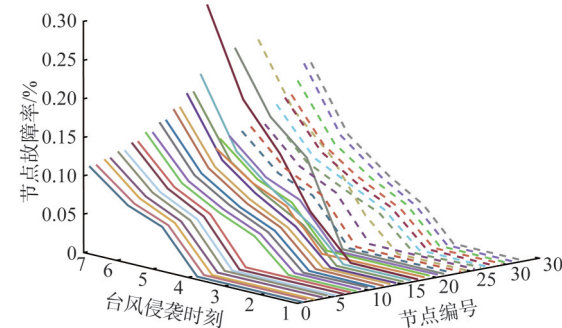


图7 台风侵袭时各节点的故障率

Fig. 7 Failure rates of each node during typhoon period

线,通过蒙特卡洛随机抽样法,获得随机一种故障情况集合。同时,根据负荷节点的缺供电情况,计算所有缺供电负荷节点1 h的经济损失指标。台风侵袭阶段,配电网系统元件随时可能出现故障情况,考虑到现实情况中获取故障集合和采取对应应对措施都无法实时即刻完成,故将台风入侵时段进行分时场景进行分析。以0.5 h时间区分不同场景,不同的场景下,配电网系统元件故障情况不同,所采取的最优切负荷策略也不同。目的是为了适应配电网不同分时场景下出现的各种故障情况,采取最优切负荷策略以抵抗台风灾害,将配电网灾时阶段的经济损耗降到最低。表5列出了一次随机模拟台风侵袭事件中灾时阶段各场景的配电网系统中故障线路和故障节点的具体情况和负荷节点的经济性指标。考虑到主网有限的电力供应以及故障线路和节点的分布,通过控制系统内各负荷节点的负荷开关以及对可控负荷进行按比例切除,以实现最优切负荷策略,以保障灾时阶段下重要负荷节点的正常供电,同时计算出每个场景下的经济损失指标。在场景1中,虽然配电网系统元件没有发生故障,但由于主网供电不足,不能保障配电网系统内全部负荷

节点的正常供电,故进行最优切负荷控制切除配电网系统内部分三级负荷节点(即负荷节点2,7,9,17,20,26,28,29),以确保所有一二类重要负荷的正常供电,从而使电网的经济损失指标最小。在场景2—7中,配电网内发生故障导致系统被分割成大小不一的孤岛。在这些孤岛内进行最优切负荷控制,尽可能保障所有一类重要负荷的正常供电,并对二类 and 三类负荷实施切负荷操作,从而使各场景下电网的经济损失达到最小。以场景6为例进行分析,在当前场景下,配电网内线路5,10,17,18,22,23,25发生断线故障,导致配电网被迫形成多个孤岛如图8所示。由于主网供电受限和节点5的DG出力上限无法对新形成的孤岛内的全部负荷节点进行供电,所以除系统故障节点2被迫切除外,切除三类负荷节点20的全部负荷和对负荷节点8上的负荷按比例切除,确保其余的一二类重要负荷正常供电,使得负荷节点的供电经济性指标最小。节点25和节点32共同组成的孤岛内,由于无法满足一类重要负荷节点30的供电需求,故将其切除,将供电资源分配到孤岛内的其他负荷节点上。而节点33虽然为二类重要负荷,但是按比例切除小部分电力供应,分配到负荷节点28、29,恢复其供电所得的全系统经济性指标最小。同样的切负荷调控操作也作用在其他场景的其他孤岛上,这里不再展开。

1. 1. 10 灾后阶段

台风灾害离境后,配电网系统的故障集合不再继续增加,同时可以进行配电网重构和移动应急电源车的调配等故障供电恢复策略。

为验证本文提出的灾后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灾后供电恢复策略。

表5 不同场景下的系统切负荷操作

Tab. 5 Important load shedding under different scenarios

场景	系统故障线路	系统故障节点	切负荷节点	可控负荷切除比例/%	经济性指标/(元·h ⁻¹)
1			2,7,9,17,20,26,28,29	8(0.813 2),27(0.655 9)	951.992 9
2	10		2,7,8,9,17,20,26,28,29	27(0.437 9)	976.266 5
3	8,10,17		2,7,9,10,18,20,26,28,29	8(0.718 3),27(0.377 2)	7 756.287 2
4	8,10,17,22,23		7,9,10,18,20,23,25,26,28,29	8(0.666 0),27(0.034 9)	8 945.290 3
5	8,10,17,22,23,25	2	2,9,10,18,20,23,25,26,27,30	8(0.757 4),33(0.010 1)	10 747.548 4
6	8,10,17,22,23,25	2,13	2,9,10,13,18,20,23,25,26,27,30	8(0.757 4),33(0.010 1)	10 807.548 5
7	8,10,17,22,23,25	2,13,17,32	2,9,10,13,17,18,20,23,25,30,32	8(0.757 4)	10 951.475 1

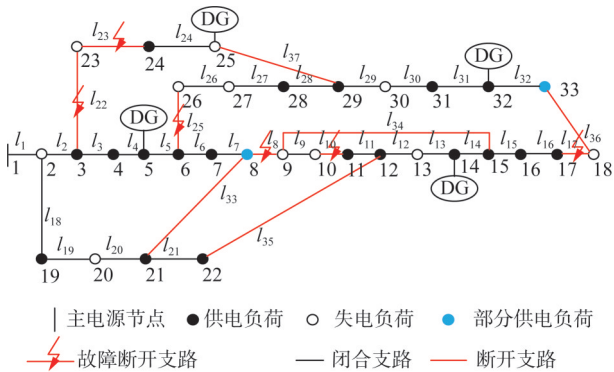


图8 场景6配电网系统故障情况

Fig. 8 Fault situation of distribution network system at scene 6

- 1) 方案一, 仅考虑移动应急电源车的方法恢复对失电负荷的供电。
- 2) 方案二, 仅考虑配电网重构的方法恢复对失电负荷的供电。
- 3) 方案三, 结合配电网重构方法和移动应急电源车两种复电策略, 恢复对失电负荷的供电。

表6列出了3种方案下重要负荷的恢复供电比例和整个配电网系统的经济损失情况。3种恢复供电方案均是现阶段灾后复电最有效的方案, 所以3种方案对一类重要负荷的供电比例均达到了100%, 但是方案一和方案二的复电能力较为单一, 无法完全恢复二类重要负荷的供电, 并且牺牲了大量普通负荷的供电, 导致灾后阶段的经济损失较高。配电网重构的复电策略相比于移动应急电源车较为灵活, 可以恢复较高比例的二类重要负荷的供电, 但由于没有额外电源供给, 故不得不切除大量普通负荷的供电。方案三是将配电网重构和移动应急电源车二者相结合的复电策略, 在配电网重构的基础上进行移动应急电源车的调配, 可以恢复全部一二类重要负荷的供电。同时, 移动应急电源车可以与系统内的DG联合, 形成更大范围的孤岛, 从而对更多负荷节点提供保供电。这种策略不仅提升了配电网的供电稳定性, 还促进了风电的消纳, 降低了弃风率, 从而进一步提升了灾后阶段配电网系统的经济性。

方案三的灾后配电网重构和移动应急电源位置调配如图9所示。通过在节点23接入移动应急电源车, 弥补了仅靠配电网重构无法恢复节点23供电不足的问题。其他应急电源车接入节点11和24, 扩大了节点14和节点25、节点32上DG形成的孤岛范围, 扩大了恢复供电的范围。图10展示了3种

表6 不同方案下重要负荷供电量

Tab. 6 Important load shedding under different schemes

方案	一类负荷供电比例/%	二类负荷供电比例/%	三类负荷供电比例/%	灾后经济损失/(元·h ⁻¹)
1	100	80.198 0	62.271 4	2 731.935 1
2	100	91.089 1	46.538 0	1 937.163 3
3	100	100	70.550 1	571.328 9

方案下各DG的具体出力值和消纳情况。方案二仅依靠节点25、节点32处的DG对形成的孤岛进行供电, 无法合理地分配供电资源导致节点32处的DG有0.18 MW的有功功率被舍弃。方案三调配2辆移动应急电源车接入节点24, 移动应急电源车输出的有功功率与节点32处的DG盈余的0.18 MW的有功功率共同作用恢复孤岛内负荷节点的供电, 也有助于提高了资源利用效率, 避免能源的浪费。所以方案三能够有效减少了切负荷带来的停电损失和弃风经济损失, 并显著增强了配电网在灾后阶段的供电可靠性。

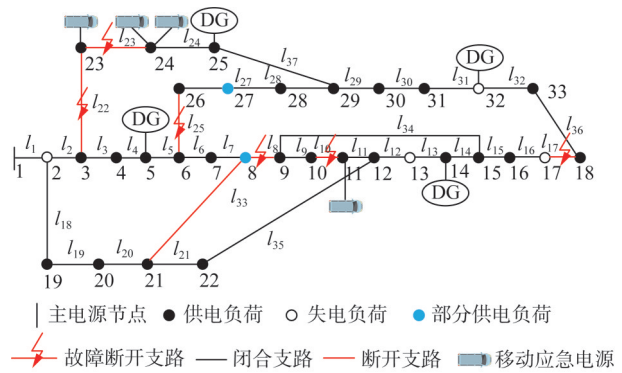


图9 灾后配电网系统重构及移动应急电源位置

Fig. 9 Reconstruction of post disaster distribution network system and location of mobile emergency power supply

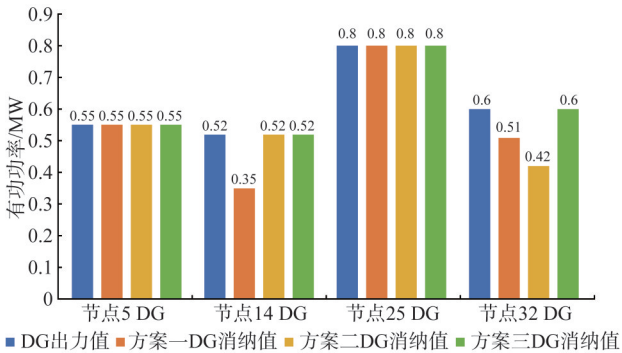


图10 不同方案下各DG出力值和消纳值

Fig. 10 Output and consumption values of each distribution generator under different schemes

5 结论

为减少极端灾害对配电网系统内的负荷供电的影响,合理调配配电网系统的资源,本文针对求解配电网在灾中最优切负荷策略和灾后供电恢复策略展开研究。

1) 在灾中阶段,提出了配电网系统最优切负荷策略的求解方法。在极端灾害情况下,通过优化资源分配,尽可能保障重要负荷的供电,减少因电力供应不足引起的经济损失。

2) 在灾后阶段,通过结合配电网重构和移动应急电源车的部署,不仅确保了所有重要负荷的正常供电,还与配电网内的 DG 协同,减少了新型能源的弃置,提高了资源利用效率。

在未来提高配电网应对极端灾害策略的研究可以考虑加入故抢修队伍的配置,和全面考虑分布式电源的不确定性和多种分布式电源互补互联特性。

参考文献

- [1] 孟凡昌,李本霞,王娟娟. 1949—2021 年登陆我国热带气旋历史规律研究[J]. 海洋预报, 2024, 41(3): 80–89.
MENG Fanchang, LI Benxia, WANG Juanjuan. A study on the characteristics of tropical cyclones landing in China from 1949 to 2021[J]. Marine Forecasts, 2024, 41(3): 80–89.
- [2] 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.
- [3] 周斌. 防御台风“彩虹”工作回顾与思考[J]. 广西电力, 2016(4): 29–31.
ZHOU Bin. Review and reflection on the defense against typhoon "Rainbow"[J]. Guangxi Electric Power, 2016(4): 29–31.
- [4] 包忠强,杨利伟,覃华,等. 超强台风“山竹”对广西电网的影响分析及建议[J]. 广西电力, 2020, 43(1): 62–66.
BAO Zhongqiang, YANG Liwei, QIN Hua, et al. Influence analysis of super typhoon "Mangkut" on Guangxi power grid and suggestions[J]. Guangxi Electric Power, 2020, 43(1): 62–66.
- [5] 张怡. 超强台风对浙江电网的影响及防范建议[J]. 浙江水利水电学院学报, 2020, 32(4): 39–44.
ZHANG Yi. Influence of super typhoon on Zhejiang power grid and preventive measures [J]. Journal of Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, 2020, 32(4): 39–44.
- [6] 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.
- [7] TARI A N, SEPASIAN M S, KENARI M T. Resilience assessment and improvement of distribution networks against extreme weather events [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2021(125): 106414.1–106414.9.
- [8] LEI S, WANG J, 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.
- [9] 汪涛,武传涛,随权,等. 计及故障维修与网络重构的灾后配电网综合调度策略[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(5): 1764–1777.
WANG Tao, WU Chuantao, SUI Quan, et al. Integrated dispatching strategy for post-disaster distribution networks with fault repair and network reconfiguration [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(5): 1764–1777.
- [10] 张亚超,谢仕炜. 面向配电网弹性提升的多时间尺度恢复策略协调优化框架[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(18): 28–34.
ZHANG Yachao, XIE Shiwei. Coordinated optimization framework of multi-timescale restoration strategies for resilience enhancement of distribution networks [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(18): 28–34.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 邢晓敏,潘成琳,李贻涛,等. 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, et al. A bi-level fault recovery strategy for distribution networks considering islanding and reconfiguration [J]. Jilin Electric Power, 2022, 50(5): 4–8.
- [14] 王卓容,石庆鑫. 基于拓扑重构与分布式电源调度的配电网灾后恢复策略[J]. 综合智慧能源, 2022, 44(2): 29–34.
WANG Zhuorong, SHI Qingxin. Post-disaster restoration strategy of power distribution systems based on topology reconfiguration and distributed generation scheduling [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(2): 29–34.
- [15] 王笑雪,迟林林,陈海文,等. 考虑移动储能的风雨灾害配电网弹性提升方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2024, 36(5): 69–79, 89.
WANG Xiaoxue, CHI Linlin, CHEN Haiwen, et al. Distribution network resilience enhancement method considering mobile energy storage under typhoon and storm disasters [J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2024, 36(5): 69–79, 89.
- [16] 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.
- [17] MA N, XU Z, WANG Y, et al. Strategies for improving the resiliency of distribution networks in electric power systems during typhoon and water-logging disasters [J]. Energies, 2024, 17(5): 1165.
- [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] 季孔阳, 李学明, 高见, 等. 城市暴雨洪涝灾害脆弱性评价[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(3): 13-20.
- JI Kongyang, LI Xueming, GAO Jian, et al. Assessment of urban vulnerability to heavy rain and flood disasters [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(3): 13-20.
- [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] 梁振锋, 闫俊杰, 李江峰, 等. 极端暴雨灾害下城市配电网风险评估方法[J]. 电网技术, 2023, 47(10): 4180-4190.
- LIANG Zhenfeng, YAN Junjie, LI Jiangfeng, et al. Risk assessment of urban distribution network under extreme rainstorm disasters [J]. Power System Technology, 2023, 47(10): 4180-4190.
- [23] 张毓, 雷芷琪. 基于蒙特卡洛法的配电网可靠性和故障自愈模型[J]. 科技与创新, 2022(16): 139-142.
- ZHANG Yu, LEI Zhiqi. A model of distribution network reliability and fault soft self-healing based on monte carlo method [J]. Science and Technology & Innovation, 2022(16): 139-142.
- [24] 吴疆, 吕林, 黄媛, 等. 灾害全过程配电网弹性评估方法及提升策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(3): 32-42.
- WU Jiang, LÜ Lin, HUANG Yuan, et al. Evaluation method and promotion strategy for distribution network resilience during the entire process of disaster [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(3): 32-42.
- [25] 徐望胜, 随权, 林湘宁, 等. 考虑充-换电站电池能量转供链路的配电网灾前-灾后两阶段恢复策略[J]. 电力建设, 2024, 45(7): 76-87.
- XU Wangsheng, SUI Quan, LIN Xiangning, et al. A two-stage recovery strategy for distribution networks before and after disasters considering the battery energy-transfer link of battery charging-swapping stations [J]. Electric Power Construction, 2024, 45(7): 76-87.
- [26] 刘艳坤, 常仲学, 孙勇卫, 等. 基于直线检测算法和模态时间差的多支配电网故障定位[J]. 电力建设, 2025, 46(11): 110-120.
- LIU Yankun, CHANG Zhongxue, SUN Yongwei, et al. Multi-branch fault location in distribution networks based on the line segment detector algorithm and modal time differences [J]. Electric Power Construction, 2025, 46(11): 110-120.
- [27] 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.
- [28] 林朝华, 张军达, 吴荣芬, 等. 基于多区间不确定集的电-气互联有功-无功协同鲁棒优化方法[J]. 电力建设, 2025, 46(4): 137-149.
- LIN Chaohua, ZHANG Junda, WU Rongfen, et al. An active-reactive power coordinated robust optimization method for electricity gas interconnection based multiple interval uncertain [J]. Electric Power Construction, 2025, 46(4): 137-149.
- [29] 王宜元, 张玮, 李长宇, 等. 考虑随机性的主动配电网有功无功可行域计算方法[J]. 中国电力, 2025, 58(4): 182-192.
- WANG Xuanyuan, ZHANG Wei, LI Changyu, et al. A method for calculating the feasible operation region of active and reactive power in active distribution networks considering stochasticity [J]. Electric Power, 2025, 58(4): 182-192.

收稿日期: 2024-11-15; 网络首发日期: 2025-02-28

作者简介:

吴龙腾(1988), 男, 高级工程师, 学士, 研究方向为配电网调度运行控制, 872535891@qq.com;

孟子杰(1984), 男, 高级工程师(教授级), 硕士, 研究方向为电网调度运行控制管理;

吴杰康(1965), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 博士, 研究方向为电力系统运行与控制。

征稿启事

《南方电网技术》是由中国南方电网有限责任公司主管、南方电网科学研究院有限责任公司主办的电力技术类科技期刊,向国内外公开发行人。刊登电力系统的科研、规划、设计、工程、生产运行、设备和系统维护等方面的成果、经验和动态,尤其是科研创新方面的论文。设有特约专稿、高压直流输电、高电压与绝缘、系统分析与运行、控制与保护、调度与通信、输变电技术、电力技术经济、智能电网、分布式电源与微电网、低碳电力等栏目。热烈欢迎国内外的电力研究人员、工程技术人员、大专院校师生踊跃投稿。

1 文稿要求

1)文稿应未在其他刊物上发表过,译文稿件须附上原作者的书面许可证明。内容要有科学性、创新性和实用性;论点明确、数据可靠、说理严谨、数学推导简明;语言流畅、文字简练、层次分明、重点突出。

2)学术论文请按GB/T 7713.2—2022《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》书写,篇幅以版面不超过9 000字(包括图表所占篇幅)为宜。同时请写明如下a、b、c、d、e五项:

a)作者署名(不宜超过7位)、作者单位、地址、电话、email信箱和邮政编码;

b)论文题目和作者单位英译文,作者姓名的汉语拼音;

c)作者的简历,包括姓名、出生年、性别、籍贯、职称、学位、当前从事的研究或工作等项;

d)350字左右的中文摘要,3~8个关键词,以及摘要和关键词相应的英文文本。摘要采用第三人称写法,内容包括论文的目的、方法、结果和结论;

e)若为国家基金资助项目或部、省级重大科研攻关项目,需提供项目名称及编号。

2 书写格式

1)要求文稿正文字号为5号,汉字字体为宋体,英数字体为Times New Roman,希腊字体为Symbol。文稿须采用可编辑的电子文档形式。

2)计量单位采用国家法定计量单位和符号,不能用“大气压”、“kgf/cm²”、“卡”、“ppm”等已废除的计量单位。

3)文中和公式中容易混淆的字符请注明文种(希文、英文、罗马字等)、大小写、上下标及上下标字母含义,表示矢量及矩阵的字符用黑斜体表示或特别注明。

4)文稿标题中不宜用缩略词(化学符号和公知公用者除外);摘要和正文中的缩略词在第一次出现时必须写出全称,后加括号附缩略词。

3 表格、插图及参考文献

1)表格尽量采用“三线表”。表格的上方写表序和表名。表名应有自明性且中文、英文表名并列。表注放在表底,缩入1个汉字以“注:”起头排版。

2)插图的下方面应有图序和图名。图名应有自明性且中英文图名并列。工程图、电气图和函数图采用AutoCAD、

Adobe Illustrator或Corel DRAW软件绘制,工程图和电气图要符合国家标准规定,函数图要标明曲线序号及其注释,坐标轴上要有标值、标目,注明物理量和单位;数码照片图具备200万总像素以上。

3)图片和表格中的文字、变量、单位和数字要齐全、清晰。

4)参考文献应选用公开发表的资料,按引用的先后次序列表于文后,以[1]、[2]…标识序号,且与正文中的指示序号一致。按《信息与文献 参考文献著录规则,GB/T 7714—2015》和《中国学术期刊(光盘版)检索与评价数据规范,CAJ-CD B/T 1—2006 修订版试行稿》的要求著录文后参考文献。中文参考文献后要并列其英文译文(如示例[6]所示)。

文献类型及其标识为:普通图书[M];会议论文[C];报纸文章[N];期刊文章[J];学位论文[D];报告[R];标准[S];专利[P];汇编[G];档案[B];古籍[O];参考工具[K];其他未说明的文献类型,例如可公开的政府行政部门编号文件、行业或大公司的技术规范或工作手册[Z]。网上期刊[J/OL];网上电子公告[EB/OL]。电子文献尚需在载体标记后加上发表或更新日期(加圆括号)、引用日期(加方括号)和电子文献网址。

4 投稿

1)请登录《南方电网技术》编辑部网站<https://nfdwjs.csg.cn>,选择“作者登录”,登录或注册登录后选择投稿并按提示操作,登录方面出现问题请致电020-36625646咨询。

2)投稿时务必附上联系电话(手机为佳)。

3)编辑部不保证留存稿件,请作者自留底稿。稿件评审进程和结论可在《南方电网技术》编辑部网站上即时查询。作者也可致电020-36625642、36625643或发送电子邮件到nfdwjs@csg.cn向编辑部了解审稿情况。

4)文章一经发表,编辑部便取得作者的自动授权,可将文章收录入本刊网站,及与本刊有合作关系的数据库。

参考文献著录格式示例:

- [1] 刘国钧,陈绍业,王凤翥. 图书馆目录[M]. 北京:高等教育出版社,1957:15-18.
- [2] 钟文发. 非线性规划在可燃毒物配置中的应用[C]//赵玮. 运筹学的理论与应用——中国运筹学会第五届大会论文集. 西安:西安电子科技大学出版社,1996:468-471.
- [3] 冯西桥. 核反应堆压力管道与压力容器的LBB分析[R]. 北京:清华大学核能技术设计研究院,1997.
- [4] 中国国家标准化管理委员会. 信息与文献 参考文献著录规则:GB/T 7714—2015[S]. 北京:中国标准出版社,2015.
- [5] 邓一刚. 全智能节电器:200610171314.3[P]. 2006-12-13.
- [6] 陈祥. 无线技术在现代电网管理中的应用与展望[J]. 南方电网技术,2009,3(6):85-89.
CHEN Xiang. Development of wireless technology in modern power grid management and its perspective [J]. Southern Power System Technology, 2009,3(6):85-89.
- [7] 王明亮. 关于中国学术期刊标准化数据库系统工程的进展[EB/OL]. (1998-08-16) [1998-10-04]. <http://www.cajcd.edu.cn/pub/wml.txt/980810-2.html>.

《南方电网技术》编辑部