

基于台风场景模拟的配电网架空线路薄弱环节辨识方法

李琳¹, 穆云飞¹, 殷自力², 贾宏杰¹, 王晓辉³, 张功林⁴

(1. 天津大学 智能电网教育部重点实验室, 天津 300072;

2. 国网福建省电力有限公司, 福建 福州 350003; 3. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100083;

4. 国网福建省电力有限公司电力科学研究院, 福建 福州 350007)

摘要:为降低台风造成的配电网负荷和经济损失,需对配电网架空线路的薄弱环节进行辨识。首先,考虑台风预报信息及其不确定性,利用Batts模型刻画台风登陆后风场各点风速及其衰减过程;然后,基于电杆风荷载与抗弯强度的关系建立电杆与线路故障率模型;同时,综合考虑线路故障频率及供电负荷重要程度定义线路脆弱度指标,并采用层次分析法确定指标中各因素权重;最后,提出一种台风场景下基于蒙特卡罗法的配电网架空线路薄弱环节辨识方法。典型算例结果表明,以所提方法确定的线路薄弱环节作为加固配电网混凝土电杆、分配应急发电车的依据,可有效降低台风灾害下配电网负荷和经济损失。

关键词:风场模型;架空线路故障率;薄弱环节;线路脆弱度指标;层次分析法

中图分类号:TM 73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202004021

0 引言

我国是世界上受台风影响较严重的国家之一。近年来,随着全球气候变暖特征逐渐明显,台风登陆次数明显增长。据统计,我国每年因台风造成的经济损失高达300亿元,死亡人数达数百人^[1-2]。对配电系统而言,台风登陆后通常造成大面积的停电,甚至可能导致电力灾难。例如:2005年,强台风“达维”造成海南配电网设备严重受损,10 kV主线路及大量用户受灾停电,海南电网崩溃^[3];2006年台风“桑美”登陆温州,最大风速达68 m/s,510条配电线路因损毁性故障停电,断杆、倒杆一万余基,经济损失近2亿元^[4];2008年强台风“黑格比”登陆广州,广州西部沿海地区35、10 kV线路大量跳闸,10 kV配电网倒杆、断杆近万基;2016年台风“尼伯特”给福建电网带来重创,中低压配电网遭受毁灭性破坏。福建省电力公司发布的《重要保电事件处置应急预案》中,将台风归为对电网和设备构成严重威胁的危险源,防风抗台的抢险工作不容小觑。在城郊、乡镇、农村等欠发达地区配电网中,架空线路中电杆大

多为混凝土电杆。台风风速通常高于电杆设计风速,导致台风侵袭过程中混凝土电杆故障现象十分严重^[5],成为电力部门抢险重点关注的问题。然而,考虑到这些地区对配电网的抢险能力有限,而架空线路数量庞大,如福建省沿海城市泉州,10 kV配电网架空线路比例高达80%,在台风来临前对架空线路进行成片改造存在实际困难,只能对有限的抢险物资进行分配预防台风。尽管气象部门在台风登陆前可以提供预报信息,但电力部门抢险过程中仍存在缺少物资分配依据的问题。因此,如何寻找台风中配电网最需要支援的部位,最大限度降低台风后配电网的损失,亟需对配电网架空线路的薄弱环节进行辨识,使抢险抗灾物资得到高效利用。

目前该领域已有部分研究。文献[6]基于台风预测信息对预警区域进行网格划分,提出一种差异化输出预警结果的方法;文献[7]提出一种在台风天气下运行的电网定量弹性评估框架,应用灾害风险评估的台风风场模型来评估影响的强度和持续时间;文献[8]提出基于多个元件脆弱性指标排序的薄弱环节识别策略;文献[9]设计并实现了一种基于自律分散系统模型的多维度电网薄弱环节跟踪及分析系统,对薄弱环节定义、分析方法、数据来源和结果展示等维度多样性有较好的适应性;文献[10]利用可靠性跟踪方法辨识电力系统薄弱环节,通过跟踪分析可得到各元件对系统可靠性指标的“贡献”,元件的“贡献”越大,其对系统可靠性的影响就越大,即为系统薄弱环节;文献[11]提出一种基于运行可靠性模型的连锁故障模拟及系统薄弱环节分析方法。

目前常态配电网薄弱环节研究相对成熟,但针对台风场景下配电网薄弱环节识别方法的研究还相对较少,且现有薄弱环节识别方法更多关注负荷侧,

收稿日期:2019-06-28; **修回日期:**2020-02-27

基金项目:国家电网公司科技项目(多元主体博弈下的用户侧综合能源优化理论与方法研究)(U1766210);国家电网公司科技项目(基于营配调信息贯通下的配电网调度应用管控验证研究)

Project supported by the Science and Technology Project of SGCC (User-side Integrated Energy Optimization Theory and Method Research under Multi-subject game)(U1766210) and the Science and Technology Project of SGCC (Research and Demonstration of Management and Control Verification for Distribution Network Dispatching based on Battalion Coordination Information)

而忽略了特定场景下元件故障导致负荷损失的概率。本文基于台风预报信息及其不确定性,利用Batts模型刻画台风衰减过程中风场各点的风速;根据台风与电杆相互作用机理建立电杆及线路故障率模型;考虑线路故障频率及供电负荷重要程度,定义线路脆弱度指标;提出台风场景下配电网架空线路薄弱环节辨识方法。算例验证表明,本文方法可使有限抗灾物资得到更有效的匹配,进一步降低台风过境后配电网的负荷损失及经济损失,对沿海地区防风抗台工作具有一定的指导意义和理论参考价值。

1 Batts 台风模型

要对台风场景下配电网薄弱环节进行识别,需对台风登陆过程中风速、风向进行准确模拟,以判断处于不同地理位置的配电网在风场中承受的风速。Batts 台风模型是目前发展较为成熟的风场模型^[12-13],采用Batts模型计算台风过程中风场中各点风速的步骤如下。

(1) 计算最大风速半径 $R_{\max}$ 及梯度风速 V_{gx} 。

$R_{\max}$ 为风场气旋中心到最强烈风带的距离,通常利用其与中心气压差 ΔP 的关系进行计算,见式(1)。 V_{gx} 为气压梯度力造成的空气流动速度,见式(2)。

$$R_{\max} = e^{-0.1239\Delta P^{0.6003} + 5.1043} \quad (1)$$

$$V_{\text{gx}} = \theta \sqrt{\Delta P} - 0.5 R_{\max} f \quad (2)$$

其中, ΔP 为热带气旋外围与中心气压差(hPa),与台风登陆时间有关,外围气压取 1010 hPa; f 为地球自转科氏力系数; θ 为经验系数,本文取 6.72。

(2) 计算风场范围内各点风速。

通常平均最大风速 $V_{R_{\max}}$ 出现在 $R_{\max}$ 处。

$$V_{R_{\max}} = 0.865 V_{\text{gx}} + 0.5 V_T \quad (3)$$

其中, V_T 为台风移动的整体速度(m/s),可从气象部门发布的台风预报信息中获得。

台风移动过程中,配电网在风场中的位置不断变化,风场中不同位置瞬时风速可由式(4)得到。

$$\begin{cases} V_{\text{rin}} = V_{R_{\max}} r/R_{\max} & r \leq R_{\max} \\ V_{\text{rout}} = V_{R_{\max}} (R_{\max})^x / r & r > R_{\max} \end{cases} \quad (4)$$

其中, V_{rin} 和 V_{rout} 分别为配电线路与台风中心距离不大于和大于 $R_{\max}$ 时的瞬时风速,如图1所示; r 为配电

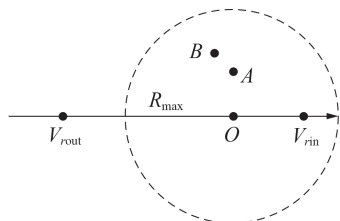


图1 Batts 台风风场示意图

Fig.1 Schematic diagram of Batts wind field

线路距台风中心的距离; x 为台风沿径向强度衰减有关的参数,取值为 0.5~0.7。

由式(5)可知,台风登陆后气旋中心气压差不断减小,进而由式(1)~(4)可知, $V_{R_{\max}}$ 及风场中各点风速不断降低。

$$\Delta P(t) = \Delta P_0 - 0.675(1 + \sin \gamma)t \quad (5)$$

其中, $\Delta P(t)$ 为台风登陆后 t 时刻的中心气压差(hPa); ΔP_0 为台风登陆时气旋外围与气旋中心气压差(hPa),由台风预报信息获得; γ 为台风登陆海岸线时与台风运动方向的夹角。

由于配电线路相对于台风半径较短,可认为同一条馈线上风速一致。但处于不同地理位置的配电网相对于台风中心位置不同,如图1中A、B两配电网,其在台风过程中承受风速也不同。电力部门在进行薄弱环节辨识时,需考虑其承受风速的差异。

2 混凝土电杆故障模型

针对本文研究的欠发达地区配电网,主要考虑台风场景下混凝土的电杆故障,暂且忽略断线的情况^[14]。且在台风场景下,电杆承受的风速剧烈,外界环境对电杆的影响主要集中在风速,为简化分析,本文忽略其他环境因素的影响。

2.1 电杆荷载

荷载是指使结构或者构建产生内力和变形的外力及其他因素^[15]。在遭受台风灾害时,电杆受到风荷载的部位主要包括导线、杆塔以及绝缘子。

导线受到的风荷载 w_x 为:

$$w_x = \alpha \mu_z \mu_{sc} d l_H \sin^2 \varphi v^2 / 1600 \quad (6)$$

杆塔受到的风荷载 w_s 为:

$$w_s = \beta \mu_z \mu_s A_g v^2 / 1600 \quad (7)$$

绝缘子受到的风荷载 w_z 为:

$$w_z = n_1 n_2 \mu_z A_p v^2 / 1600 \quad (8)$$

其中, l_H 为电线水平档距(m); w_x 为线路水平档距是 l_H 时的风荷载(kN); μ_z 为风压高度变化系数; α 为电线风压不均匀系数; μ_{sc} 为电线体形系数; d 为电线外径(m); φ 为风向与线路之间夹角; v 为线路规定基准高 h_s 处的设计风速(m/s); β 为风振系数; μ_s 为风荷载体形系数; A_g 为杆塔结构构件迎风面的投影面积(m²); n_1 为一相导线所用的绝缘子串数; n_2 为每串绝缘子的片数; A_p 为每片绝缘子的受风面积。以上参数可根据相关设计规范查得。

综合考虑3种荷载后,电杆杆身任意截面形心处受到的弯矩 M_x 按式(9)计算。由台风引起的倒杆、断杆通常发生在电杆杆根。

$$M_x = (w_{xz} h_1 + 2w_{xz} h_2 + w_{sv} \bar{h})(1 + m_x) \quad (9)$$

$$w_{sv} = \beta \mu_z \mu_s F \frac{v^2}{1600} \frac{D_0 + D_x}{2} h_1 \quad (10)$$

$$w_{xz} = w_x + w_z \quad (11)$$

$$\bar{h} = \frac{h_1}{3} \frac{2D_0 + D_x}{D_0 + D_x} \quad (12)$$

其中, h_1 为电杆长度(m); h_2 为杆根至横担距离(m); F 为杆身投影面积(m²); D_0 为电杆稍径(m); D_x 为电杆杆根截面直径(m); m_x 为附加弯矩系数。

2.2 电杆故障率模型

考虑到电杆制作工艺方面的差异,其抗弯强度存在一定的分散性。电杆的抗弯强度 M_p 通常符合正态分布,其概率密度函数如式(13)所示^[16]。

$$f_R(M_p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \delta_p} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{M_p - \mu_p}{\delta_p} \right)^2} \quad (13)$$

其中, μ_p 为电杆抗弯强度的均值,通过实际运行经验或破坏性试验得到; δ_p 为电杆抗弯强度的标准差。

由式(9)~(13)可求得电杆的抗弯强度变量及荷载效应。由此建立如式(14)所示判据 Z 。

$$Z = M_p - M_x \quad (14)$$

由于 M_p 服从正态分布,则 Z 也服从正态分布。可以得到以下判据:

$$\begin{cases} Z \geq 0 & \text{电杆处于正常状态} \\ Z < 0 & \text{电杆处于故障状态} \end{cases} \quad (15)$$

对于特定弯矩 M_x ,电杆故障率 P 为:

$$P = P\{M_p - M_x < 0\} = \int_0^{M_x} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \delta_p} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{M_p - \mu_p}{\delta_p} \right)^2} dM_p \quad (16)$$

2.3 电杆故障率修正模型

台风场景下电杆故障率既与其自身抗弯强度相关,又受投运年限影响。对同一型号电杆,其故障发生次数与投运年限关系符合“浴盆曲线”^[17],见图2。

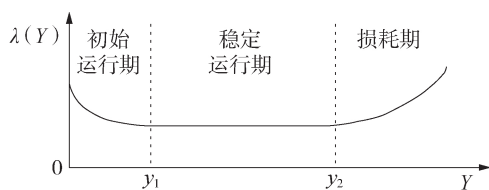


图2 电杆故障率修正系数曲线

Fig.2 Curve of pole failure rate correlation coefficient

基于电力部门统计的处于不同投运年限的电杆故障数据,通过最小二乘法拟合得到电杆故障率修正系数曲线参数。电杆故障率修正系数 $\lambda(Y)$ 用威布尔分布表示,如式(17)所示。

$$\lambda(Y) = \begin{cases} a_1 Y^{\beta_1 - 1} & 0 < Y \leq y_1 \\ 1 & y_1 < Y \leq y_2 \\ a_2 Y^{\beta_2 - 1} & Y > y_2 \end{cases} \quad (17)$$

其中, Y 为电杆投运年限; y_1 为初始运行期与稳定运行期拐点; y_2 为稳定运行期与损耗期拐点; a_1 、 a_2 为与

威布尔分布形状参数、尺度参数有关的系数;在初始运行期, $\beta_1 < 1$;在损耗期, $\beta_2 > 1$ 。

进一步根据电杆投运年限,对台风场景下电杆故障率进行修正,如式(18)中 P_f 所示。

$$P_f = \lambda(Y)P \quad (18)$$

配电网同一架空线路中各电杆相互串联,任意电杆故障均会造成整条线路退出运行。架空线路 k 的故障率 P_k 可由电杆串联模型表示,如式(19)所示。

$$P_k = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - P_f(i)) \quad (19)$$

其中, $P_f(i)$ 为第 i 根电杆故障率; m 为线路 k 中电杆根数。在台风移动过程中,电杆承受的风速实时变化,故台风登陆后架空线路故障率 P_k 为时变函数。

3 台风场景下配电网薄弱环节辨识方法

台风场景下识别配电网薄弱环节的主要方法是分析线路对系统负荷损失影响程度的大小。分为选择脆弱度指标、计算线路脆弱度、对线路脆弱度进行降序排序、选取前 q 条线路得到薄弱环节4个步骤。

3.1 线路脆弱度指标

本文综合考虑台风风速对架空线路的影响及架空线路自身供电负荷重要程度2个因素后,定义线路脆弱度指标 V_k 进行架空线路薄弱环节辨识。

$$V_k = z_1 F_k + z_2 I_k \quad (20)$$

$$z_1 + z_2 = 1 \quad (21)$$

其中, z_1 、 z_2 为权重系数; F_k 为台风场景中线路 k 故障频率; I_k 为线路 k 供电负荷的重要程度。

由某次台风预报信息获得 Batts 模型输入参数后,考虑到通常台风前 24 h 强度预报平均绝对误差为 9.2 hPa^[18],产生 $[-9.2, 9.2]$ 内的随机数 Δp 对误差进行模拟,修正后的中心气压差 $\Delta P'_0$ 为:

$$\Delta P'_0 = \Delta P + \Delta p \quad (22)$$

由式(1)~(4)可以得到台风登陆后各时刻风场中的风速。将台风侵袭配电网的过程分为 n 个时段,如图3所示。以平均风速 $V(\Delta t_i)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 表示 Δt_i 时段内风速,如式(23)所示。将 $V(\Delta t_i)$ 用于式(6)~(16)所示电杆故障率模型中,以计算台风移动过程中各 Δt_i 中线路故障率。

$$V(\Delta t_i) = \int_{t_{i-1}}^{t_i} V(t) / \Delta t dt \quad (23)$$

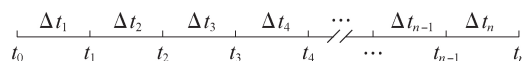


图3 台风侵袭配电网时序过程

Fig.3 Time sequence process of typhoon attacking distribution network

采用蒙特卡罗状态抽样法确定各 Δt_i 内各线路状态。对于 Δt_1 ,由式(16)~(19)得到线路 k 故障率 $P_k(\Delta t_1)$,令 $S_k(t_1)$ 表示 Δt_1 后线路 k 的状态,产生一个

在 $[0,1]$ 区间均匀分布的随机数 R ,使:

$$S_k(t_i) = \begin{cases} 0 & R > P_k(\Delta t_i) \quad \text{工作状态} \\ 1 & 0 \leq R \leq P_k(\Delta t_i) \quad \text{故障状态} \end{cases} \quad (24)$$

抽样得到配电网 K 条线路在 Δt_1 后的状态后,在 t_1 时刻各线路状态的基础上,继续抽样得到 t_2 时刻各线路状态(若线路 k 在 Δt_1 故障,在 Δt_2 后的抽样中保持故障状态),直到完成对 Δt_n 线路状态的抽样。得到具有 K 条线路系统最终状态 S :

$$S = (s_1, \dots, s_i, \dots, s_K) \quad (25)$$

确定配电网最终状态 S 后,即完成了对该台风过程的一次仿真。对该次台风仿真足够多次(N 次), F_k 即为线路 k 最终处于故障状态的次数与仿真总次数 N 之比,如式(26)所示。

$$F_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s_k(i) \quad (26)$$

由式(24)~(26)知,每次台风过程模拟后的配电网最终状态 S 与各 Δt_i 内线路故障率 $P_k(\Delta t_i)$ 相关;由第2节知, $P_k(\Delta t_i)$ 又取决于台风移动过程中各 Δt_i 内的平均风速,故 F_k 的取值紧密耦合于台风过程。

线路 k 供电负荷的重要程度为:

$$I_k = Q_k E_k / \sum_{i=1}^M Q_i E_i \quad (27)$$

其中, M 为配电网负荷节点总数; Q_i 和 Q_k 分别为负荷节点 i,k 的负荷量(MW); E_i 和 E_k 分别为负荷节点 i,k 单位负荷的经济价值(元/(MW·h))。

3.2 脆弱度指标权重确定方法

层次分析法是一种定性和定量相结合的系统化、层次化的分析方法,采用经验判断量化各项标准的重要程度^[19]。采用该方法确定 V_k 中各因素的权重系数,基本步骤如下。

(1)建立层次结构模型。以定位线路薄弱环节为目标,在准则层中考虑线路故障频率和负荷重要程度2个因素,将各条架空线路作为备选方案,建立图4所示薄弱环节定位分层模型。

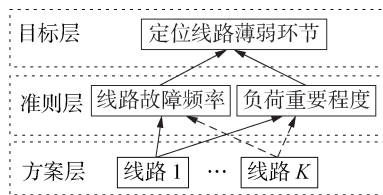


图4 薄弱环节定位分层模型

Fig.4 Hierarchical model of weak link identification

(2)构造成对比较矩阵。在比较准则层中2个因素对于目标层的重要性时,由电力部门有运行经验的人员判断量化 F_k 与 I_k 的相对重要程度。利用表1所示比较尺度构造比较矩阵 C ,如式(28)所示。

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{bmatrix} \quad (28)$$

表1 1—9比较尺度

比较尺度	定义
1	F_k 与 I_k 同样重要
3	F_k 比 I_k 稍微重要
5	F_k 比 I_k 明显重要
7	F_k 比 I_k 重要得多
9	F_k 比 I_k 完全重要
$2j(j=1,2,3,4)$	重要性在 $2j-1$ 和 $2j+1$ 之间

其中, c_{11} 与 c_{22} 分别为 F_k 和 I_k 与自身比较的相对重要程度,取值为1; c_{12} 为 F_k 相对于 I_k 的重要程度, c_{21} 与 c_{12} 互为倒数。

(3)计算权向量并进行一致性检验。计算矩阵 C 的最大特征根及对应特征向量,利用一致性指标进行一致性检验。若通过检验,特征向量(归一化后)即为权向量;否则,需重新构造 C 。

由式(20)可知,在 z_1, z_2 确定后, F_k 与 I_k 数值越大,线路 k 的脆弱度指标越高,在台风场景下系统更容易遭受较大的负荷损失。根据电力部门储备的抗灾物资,本文选取脆弱度指标高的前 q 条线路为配电网架空线路的薄弱环节。

3.3 配电网架空线路薄弱环节辨识流程

以式(29)定义台风场景下配电网失负荷指标LLR(Lose of Load Risk index),一方面用其比较对选取的薄弱环节进行提升前后配电网失负荷量的变化,另一方面,将失负荷指标结果收敛作为终止对台风过程模拟的判据,如式(30)所示。

$$I_{LLR} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_{lr}(i) \quad (29)$$

$$U = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_{lr}(i) - I_{LLR})^2} / I_{LLR} \quad (30)$$

其中, I_{LLR} 为配电网失负荷指标; $I_{lr}(i)$ 为第 i 次模拟台风后由系统最终状态 S 确定的负荷损失; U 为方差系数,其值小于阈值时终止对台风过程的模拟。

图5给出了台风场景下线路薄弱环节辨识的具体流程。结合台风预报信息及Batts模型,在得到台风过程中各 Δt_i 内的平均风速后,计算对应时刻线路故障率;由蒙特卡罗抽样过程确定一次台风模拟后线路状态并计算 $I_{lr}(i)$;重复对台风过程的仿真,当方差系数 U 小于阈值时停止,确定仿真次数 N 。对 N 次仿真结果进行统计,计算各线路脆弱度指标,根据电力部门抢险能力确定前 q 条脆弱度指标高的线路为系统薄弱环节。

基于本文提出的薄弱环节辨识方法所定位出的配电网薄弱线路,仅与线路电杆情况(型号、档距、运行年限)及线路供电负荷重要程度相关,不涉及潮流计算过程,故适用于配电网不同电压等级架空线路薄弱环节的识别。

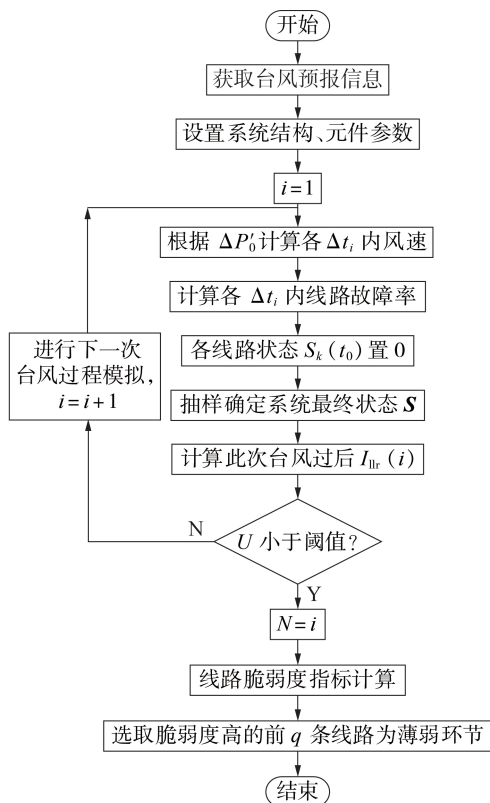


图5 薄弱环节辨识流程图

Fig.5 Flowchart of weak link identification

在台风到来前,根据气象预报信息,电力部门通常会预先采取加固电杆、分配应急发电车等防风措施减小台风过境后的负荷损失。传统的物资分配方法(以下简称传统方法)将负荷量更大、经济价值更高的负荷节点所在线路视为薄弱环节,优先采取薄弱环节提升措施。下文通过算例对传统方法与本文方法定位的薄弱环节采取预防措施后的负荷损失进行比较。

4 算例分析

本文以附录中图 A1 所示 IEEE RBTS BUS6 馈线系统为例,验证所提台风场景下薄弱环节辨识方法的有效性。系统中各条架空线路长度及负荷节点数据分别如附录中表 A1 和表 A2 所示,表中未给出线路均为电缆线路。

图6为某次台风侵袭配电网过程示意图。假设从气象部门获得此次台风登陆时中心气压差 $\Delta P_0 = 25$ hPa,登陆后移动路径为 O_1-O_4 ,与横轴夹角为 45° 。建立如图所示直角坐标系,设台风登陆坐标在原点 O_1 ,图中五角星表示配电网地理位置,其坐标为 $(100, 100)$ km。 O_1-O_4 移动过程中圆半径逐渐增大,表示台风登陆后风场扩大、强度衰减的过程。

根据《配电网运行规程》^[20],取 35 kV 配电网架空线路电杆平均档距为 300 m,10 kV 架空线路电杆平均档距为 100 m,设混凝土电杆承载能力校验弯

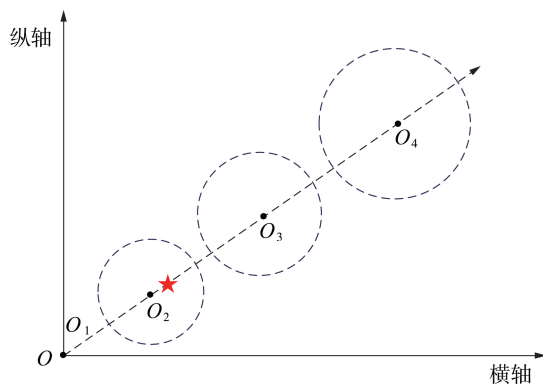


图6 台风登陆过程示意图

Fig.6 Schematic diagram of typhoon landing process

矩 $M_u = 48.76$ kN·m。在该强度下,混凝土电杆故障率与风速的关系如图7所示。由图可见,该强度下电杆的设计风速约为 30 m/s。

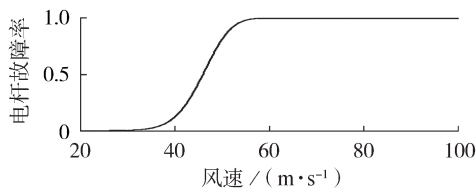


图7 电杆故障率曲线

Fig.7 Curve of pole failure rate

按照图5所示台风场景下配电网架空线路薄弱环节辨识方法流程计算各架空线路脆弱度指标。配电网失负荷指标计算结果收敛后,在该台风强度下,构建不同的比较矩阵 C ,并得到2组式(20)中所涉及因素的权重: $z_1=0.5, z_2=0.5$ (场景1); $z'_1=0.34, z'_2=0.66$ (场景2)。表2和表3分别给出了2个场景中部分架空线路脆弱度指标计算结果。

表2 场景1线路脆弱度指标计算结果

Table 2 Calculative results of vulnerability index of overhead lines of Scenario 1

线路编号	V_k	线路编号	V_k
30	1.00	28	0.22
32	0.59	62	0.21
64	0.27	52	0.18
58	0.27	63	0.17
34	0.22		

表3 场景2线路脆弱度指标计算结果

Table 3 Calculative results of vulnerability index of overhead lines of Scenario 2

线路编号	V_k	线路编号	V_k
30	1.00	34	0.19
32	0.57	62	0.16
64	0.22	52	0.16
28	0.20	39	0.13
58	0.20		

由于电力部门的物资、人员配置有限,仅选取前9条($q=9$)脆弱度指标最高的架空线路采取加装防风拉线、分配应急发电车等措施,以降低线路在台风侵袭后的负荷损失。根据表2、表3线路脆弱度指标计算结果,2个场景架空线路薄弱环节辨识结果如表4所示。假设对确定的薄弱环节采取措施后,所在线路不再出现失负荷现象。表4同时给出了根据本文方法与传统方法确定的薄弱环节被提升后系统负荷损失及经济损失结果。计算经济损失时,设线路故障修复时间为24 h。

表4 提升薄弱环节后系统负荷及经济损失
Table 4 Load and economic loss of system after eliminating weak links

方法	场景	薄弱环节 线路编号	LLR / MW	经济损失 / 万元
传统方法		30,32,43,64,47, 62,39,58,38	2.658 1	3.769 9
本文方法	1	30,32,64,58,34, 28,62,52,63	2.227 3	3.296 4
	2	30,32,64,28,58, 34,62,52,39	2.250 1	3.274 3

由表4可见,与传统方法相比,综合考虑线路故障频率与负荷重要程度2个因素确定的线路薄弱环节得到提升后,台风场景中配电网的负荷损失和经济损失得到明显降低,降低程度与脆弱度指标中各因素权重设置有关。结果表明,在台风到来前,对本文方法确定的线路薄弱环节进行提升,可以使防风拉线、应急发电车等物资得到更有效的匹配。

5 结论

本文提出一种台风场景下配电网薄弱环节辨识方法。基于Batts模型并考虑台风强度预测误差模拟台风侵袭配电网的过程,进一步定义线路脆弱度指标,基于蒙特卡罗抽样对配电网薄弱环节进行定位。通过仿真可得出如下结论:

(1)配电网在台风灾害中所承受的风速与其在风场中的位置及台风强度有关,且随台风中心的移动风速不断变化,对配电网产生的影响也不尽相同;

(2)在台风登陆前抢险时间有限、应急资源不足的情况下,应用本文配电网薄弱环节辨识方法,可在台风场景下指导配电网运行人员的抗灾防护工作,合理分配防风拉线、应急发电车等抢险物资,进一步减少负荷损失及经济损失。

未来笔者将进一步研究台风风速与杆塔的作用机理,分析杆塔周围实际环境对电杆故障率的影响,精细化电杆故障率模型;同时,进一步研究考虑时序特性的配电网抗台风措施,丰富配电网抗风防护方法。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 端义宏,陈联寿,许映龙,等. 我国台风监测预报预警体系的现状及建议[J]. 中国工程科学,2012,14(9):4-9.
DUAN Yihong, CHEN Lianshou, XU Yinglong, et al. The status and suggestions of the improvement in the typhoon observation, forecasting and warning systems in China[J]. Engineering Science, 2012, 14(9): 4-9.
- [2] 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.
- [3] 钟庆,张哲,许中,等. 广州配电网故障停电事故的自组织临界特征[J]. 电力自动化设备,2017,37(4):109-113,121.
ZHONG Qing, ZHANG Zhe, XU Zhong, et al. SOC characteristics of power-supply failure of Guangzhou distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(4): 109-113, 121.
- [4] 吴明祥,包建强,叶尹,等. 超强台风“桑美”引起温州电网输电线路事故的分析[J]. 电力建设,2007,28(9):39-41.
WU Mingxiang, BAO Jianqiang, YE Yin, et al. Transmission line accident analysis of Wenzhou grid caused by super typhoon “SAOMAI”[J]. Electric Power Construction, 2007, 28(9): 39-41.
- [5] 彭向阳,黄志伟,戴志伟. 配电线路台风受损原因及风灾防御措施分析[J]. 南方电网技术,2010,4(1):99-102.
PENG Xiangyang, HUANG Zhiwei, DAI Zhiwei. Analysis on the cause of distribution line's damage during typhoon and counteract measures[J]. Southern Power System Technology, 2010, 4(1): 99-102.
- [6] 黄勇,魏瑞增,周恩泽,等. 台风灾害下输电线路损毁预警方法[J]. 电力系统自动化,2018,42(23):142-147.
HUANG Yong, WEI Ruizeng, ZHOU Enze, et al. Early warning method of transmission line damage under typhoon disaster[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(23): 142-147.
- [7] YANG Y H, TANG W H, LIU Y, et al. Quantitative resilience assessment for power transmission systems under typhoon weather[J]. IEEE Access, 2018, 6: 40747-40756.
- [8] WANG M, XIANG Y M, WANG L F, et al. Critical line identification for hypothesized multiple line attacks against power systems[C]//2016 IEEE / PES Transmission and Distribution Conference and Exposition(T&D). Dallas, USA: IEEE, 2016: 1-5.
- [9] 代贤忠,沈沉,陈颖,等. 自律分散的多维度电网薄弱环节跟踪及分析系统设计与实现[J]. 电力系统自动化,2015,39(4):82-88.
DAI Xianzhong, SHEN Chen, CHEN Ying, et al. Design and implementation of autonomous decentralized multidimensional power system weak link tracking and analysing system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(4): 82-88.
- [10] 纪静,谢开贵,曹侃,等. 广东电网薄弱环节辨识及可靠性改善分析[J]. 电力系统自动化,2011,35(13):98-102.
JI Jing, XIE Kaigui, CAO Kan, et al. Weak part identification and reliability improvement analysis of Guangdong Power Grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(13): 98-102.
- [11] 程林,刘满君,易俊,等. 基于运行可靠性模型的连锁故障模拟及薄弱环节分析[J]. 电网技术,2016,40(5):1488-1494.
CHENG Lin, LIU Manjun, YI Jun, et al. The power system cas-

- cading outage simulation and vulnerability analysis based on operational reliability model[J]. Power System Technology, 2016, 40(5):1488-1494.
- [12] 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.
LAN Ying. Distribution system reliability evaluation and design considering influence of typhoon[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [13] CASSOLA F, BURLANDO M. Wind speed and wind energy forecast through Kalman filtering of numerical weather prediction model output[J]. Applied Energy, 2012, 99:154-166.
- [14] 许丹, 唐巍. 基于区域可达性分析的复杂配电网可靠性评估[J]. 电工技术学报, 2011, 26(6):172-178.
XU Dan, TANG Wei. Reliability evaluation of complex distribution networks based on regional accessibility analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(6):172-178.
- [15] 谢强, 孙力. 覆冰荷载作用下500 kV输电杆塔结构破坏机理试验分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(12):3090-3096.
XIE Qiang, SUN Li. Experimental analysis on failure mechanism of 500 kV transmission tower under ice loading[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(12):3090-3096.
- [16] 尹超雄, 唐武勤, 温灵锋, 等. 台风天气下配电网可靠性的新型评估算法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4):138-143.
YIN Chaoxiong, TANG Wuqin, WEN Lingfeng, et al. A new method for reliability evaluation of distribution network considering the influence of typhoon[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4):138-143.
- [17] 赵渊, 张煦, 杨清. 基于可靠性成本/效益分析的电网计划检修周期优化[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(20):54-60.
ZHAO Yuan, ZHANG Xu, YANG Qing. Optimal preventive maintenance cycle based on reliability cost-benefit analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(20):54-60.
- [18] 张守峰, 余晖, 向纯怡. 中央气象台台风强度综合预报误差分析[J]. 气象, 2015, 41(10):1278-1285.
ZHANG Shoufeng, YU Hui, XIANG Chunyi. Error analysis on official typhoon intensity forecasts of CMO from 2001 to 2012[J]. Meteorological Monthly, 2015, 41(10):1278-1285.
- [19] 赵书强, 汤善发. 基于改进层次分析法、CRITIC法与逼近理想解排序法的输电网规划方案综合评价[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3):143-148, 162.
ZHAO Shuqiang, TANG Shanfa. Comprehensive evaluation of transmission network planning scheme based on improved analytic hierarchy process, CRITIC method and TOPSIS[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3):143-148, 162.
- [20] 国家电网公司. 配电网运行规程: Q/GDW 519—2010[S]. 北京: 中国电力出版社, 2010.

作者简介:



李琳

李琳(1995—), 女, 河北承德人, 硕士研究生, 主要研究方向为配电网风险评估(E-mail: lilin9583@tju.edu.cn);

穆云飞(1984—), 男, 河北石家庄人, 副教授, 博士研究生导师, 博士, 通信作者, 主要研究方向为电力系统安全性与稳定性、综合能源集成与应用(E-mail: yunfeimu@tju.edu.cn);

殷自力(1982—), 男, 福建福州人, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为配电系统自动化(E-mail: 31334323@qq.com)。

(编辑 王锦秀)

Identification method of weak links of overhead lines in distribution network based on typhoon scenario simulation

LI Lin¹, MU Yunfei¹, YIN Zili², JIA Hongjie¹, WANG Xiaohui³, ZHANG Gonglin⁴

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. State Grid Fujian Electric Power Company, Fuzhou 350003, China;

3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100083, China;

4. Electric Power Research Institute of State Grid Fujian Electric Power Company, Fuzhou 350007, China)

Abstract: In order to reduce the load and economic loss of distribution network caused by typhoon, it is needed to identify the weak links of overhead lines in distribution network. Firstly, considering the forecasting information of typhoon and its uncertainties, Batts model is used to describe wind speed of each point in wind field and its attenuation process after typhoon landing. Secondly, the failure rate models of pole and line are established based on the relationship between wind load and bending strength of the pole. Meanwhile, the line vulnerability index is defined considering the line failure frequency and the load importance degree comprehensively, and the analytic hierarchy process is adopted to determine the weight of factors in the index. Finally, an identification method of weak links of overhead lines in distribution network based on Monte Carlo method is proposed under the scenario of typhoon. The results of typical case show that the load and economic loss of distribution network under typhoon disaster can be effectively reduced by taking the weak links of overhead lines determined by the proposed method as the basis for reinforcing the concrete poles and distributing emergency generators of distribution network.

Key words: wind field model; failure rate of overhead line; weak link; line vulnerability index; analytic hierarchy process

附录：

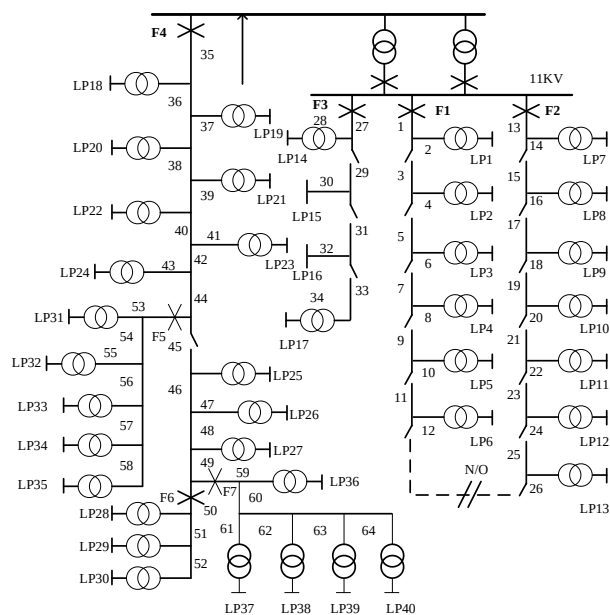


图 A1 IEEE RBTS BUS6 系统结构图

Fig.A1 Structure diagram of IEEE RBTS BUS6 system

表 A1 IEEE RBTS BUS6 线路类型及长度

Table A1 Feeder type and lengths of IEEE RBTS BUS6 system

长度/km	线路编号
0.6	2,8,12,20,24,28,34,41,47
0.75	6,10,14,22,26,30,43,61
0.8	4,16,18,32,55
0.9	38
1.6	37,39,62
2.5	36,40,52
2.8	64,
3.2	58,63

表 A2 IEEE RBTS BUS6 负荷节点数据

Table A2 Customer data of IEEE RBTS BUS6

负荷节点	平均负荷/MW	负荷节点单位电量经济损失/[元 $\cdot$ (MW $\cdot$ h) $^{-1}$]
15	1.639 1	790
16	0.902 5	790
32,37	0.192 9	790
20,30,34	0.250 1	790
21,35	0.263 3	790
24,40	0.305 7	790
26,38	0.283 1	790
14,17	0.469 7	570
5,6	0.216 3	570
2,4,11,19	0.180 8	570
12,13,22	0.207 0	570
1,3,9	0.177 5	570
7,8,10,18,23	0.165 9	570
27,29,33,39	0.158 5	570
25,28,31,36	0.155 4	570