

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106903

台风灾害下配电网脆弱线路的多角度辨识方法<sup>\*</sup>

李 扬 赵艳雷 周国良 王 凯 王庆壮 李海龙

(山东理工大学 电气与电子工程学院 淄博 255000)

**摘 要:** 针对台风灾害极易造成配电线路发生故障,进而影响配电网安全可靠运行水平的问题,提出了一种台风灾害下配电网脆弱线路的辨识方法。首先从配电网结构层面和设备层面出发,充分考虑局部及全局的网络拓扑、潮流分布、设备参数、外部环境和故障损失等影响因素,提出了度数、介数、失效率、损失度这4项线路脆弱度的多角度评价指标,然后对指标数据进行归一化处理,最后通过层次分析法和熵权法求得综合评价指标,构建了台风灾害下配电网脆弱线路多角度辨识体系。IEEE RBTS BUS6 F4 馈线系统的仿真结果表明:在系统中排第10位的脆弱线路,其度数、介数、失效率、损失度及综合脆弱度归一化数值分别为0.473 3、0.086 0、0.797 0、0.420 7、0.488 9。排在前10位的线路的指标值分别大于上述数值,其脆弱度相对较高;排在第10位之后的线路的指标值分别小于上述数值,其脆弱度相对较低。脆弱度较高的线路的特点是位于配电网的上游位置、主干线、分支处或长度较长。

**关键词:** 配电网;台风灾害;脆弱线路辨识;结构层面;设备层面

**中图分类号:** TM726 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4051

## Multi-angle identification method of vulnerable lines in distribution network under typhoon disaster

Li Yang Zhao Yanlei Zhou Guoliang Wang Kai Wang Qingzhuang Li Hailong

(School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that typhoon disaster can easily cause distribution lines to fail, thus affecting the safe and reliable operation level of distribution network, an identification method of vulnerable lines in distribution network under typhoon disaster is proposed. Firstly, considering the local and global network topology, power flow distribution, equipment parameters, external environment and fault loss, four multi-angle evaluation indexes of line vulnerability are put forward from the structural level and equipment level of distribution network. Then, normalizing the index data. Finally, a comprehensive evaluation index is obtained through the analytic hierarchy process and the entropy method, and a multi-angle identification system for vulnerable lines of the distribution network under typhoon disasters is constructed. The simulation results of IEEE RBTS BUS6 F4 feeder system show that the normalized values of degree, intermediate number, failure rate, loss degree and comprehensive vulnerability of the 10th vulnerable line in the system are 0.473 3, 0.086 0, 0.797 0, 0.420 7 and 0.488 9 respectively. The index values of the top 10 lines are larger than the above values, and their vulnerability is relatively high; The index values of the lines ranked after 10th are smaller than the above values, and their vulnerability is relatively low. The line with high vulnerability is characterized by being located in the upstream position, trunk line, branch or long length of distribution network.

**Keywords:** distribution network; typhoon disaster; vulnerable line identification; structural level; equipment level

## 0 引 言

配电网作为电力系统的主要运行部分,其安全可靠运行对电力系统的稳定性十分重要,但近年来极端自然灾害频发,导致配电网的安全状况不容乐观。台风作为极端自

然灾害的一种,具有巨大的破坏力,其发生的频率和强度在不断上升<sup>[1]</sup>,所造成的损失高居十大自然灾害之首<sup>[2]</sup>。2018年超级台风“山竹”给湖南、广东、广西、海南、贵州、云南等6个省(自治区)带来了极大影响,也给电力系统造成极大冲击,其造成的经济损失高达336.5亿元<sup>[3]</sup>;2019年

收稿日期:2021-06-09

<sup>\*</sup> 基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB0902800)资助

台风“利奇马”袭击浙江、上海、江苏、安徽、山东和福建等地,数以万计用户在此次事故中断电,直接经济损失 515.3 亿元<sup>[4]</sup>。研究表明,部分起关键作用的线路与配电网故障的传播扩大有着密切联系<sup>[5]</sup>。因此,有效辨识台风灾害下配电网中的脆弱线路对于配电网的安全可靠供电具有重要意义。

针对脆弱线路的辨识研究,当前主要有 2 类思路。一是基于复杂网络理论的网络拓扑结构分析进行脆弱线路辨识,文献[6]综述了复杂网络理论应用于电力系统的研究状况,详细介绍了基于拓扑参数法和基于拓扑图分区法两种不同分析思路;文献[7]应用复杂网络理论,基于抗毁性分析对中压配电网拓扑结构进行了研究,从拓扑结构分析的角度为中压配电网的安全可靠性分析开辟了蹊径;文献[8]基于电网拓扑结构和状态参数,综合考虑继电保护、节点电压偏移等因素,提出了辨识脆弱线路的综合介数方法;文献[9]在拓扑结构及有功潮流的基础上,考虑了无功潮流的影响,阐明了线路传输介数的物理意义。二是从网络运行状态出发实现脆弱线路的识别,文献[10]基于支路负载率及线路电抗值构建重要度和健康度指标用以辨识电网脆弱线路;文献[11]基于电网扰动下的线路潮流转移和分布特性并结合熵的原理,提出了线路潮流转移熵和分布熵来定位脆弱性支路;文献[12]综合电网拓扑结构、潮流分布及支路容量等影响,定义功率介数指标反映关键线路故障对系统的影响;文献[13]在文献[10-12]的基础上,综合考虑拓扑结构及潮流状况提出了改进负载潮流熵和支路开断熵指标,更全面、更准确地辨识电网脆弱性支路,以上脆弱线路辨识的研究成果对电网安全可靠运行具有重要价值。然而现有大多研究都集中于输电网方面,对配电网脆弱线路辨识研究相对较少;且大多研究采用较为单一评价指标对配电网进行研究,未能考虑多方面因素对研究结果的影响。

为了弥补上述各思路的不足,更全面准确地辨识台风灾害下的配电网脆弱线路,本文提出了一种多角度的辨识方法。本方法从配电网结构层面和设备层面出发,充分考虑局部和全局影响因素,提出了度数、介数、失效率 and 损失度的多角度评价指标及综合评价指标,构建了台风灾害下配电网脆弱线路的辨识体系。算例验证表明,本文方法较好地反映了台风灾害下配电网线路的脆弱度,可为配电网的防灾及制定针对性的可靠运行措施提供更准确的依据。

## 1 台风灾害下辨识配电网脆弱线路的评价指标

基于复杂网络典型特性,配电网可以表达为一张由节点集  $V$  与支路集  $L$  所组成的有权无向稀疏图,因此其可以抽象为图  $G$  及邻接矩阵  $A$ ,即:

$$G = (V, L) \quad (1)$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1N} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{N1} & a_{N2} & \cdots & a_{NN} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中,  $V$  为节点集;  $L$  为线路集; 邻接矩阵  $A$  中的元素取值为 0 或 1,若节点  $i$  和节点  $j$  之间直接有线路相连,则其值为 1,否则为 0。在配电网运行过程中,拓扑结构、潮流分布、外部环境、设备参数各故障损失等均会对脆弱线路的辨识造成影响,故综合考虑以上因素,提出了以下 4 项评价指标。

### 1.1 线路度数 $D_k$

度数通常用来描述节点的重要程度,传统节点度数定义为与该节点相连接的边的数目,因此节点的度数越大则其所连接的边数越多,该节点的重要度也就越高。对于线路而言,其首尾两端节点的重要度越高,该线路的重要度越高,因此定义本文线路度数为:

$$D_k = \sqrt{D_{k1} D_{k2}} \quad (3)$$

其中,  $D_{k1}$  及  $D_{k2}$  分别为线路  $k$  首尾两端相连的节点的度数。

考虑到配电网比输电网更稀疏,因此本文融合凝聚度的思想,即在节点度数中综合考虑边的数目与相邻节点的影响。此外,为了区分传统度数相同的节点,本文节点度数还考虑了节点输入功率的影响。综上所述,本文节点度数定义为:

$$D_{ki} = P_i \sqrt{D_i \sum_{j \in V} D_j} \quad (4)$$

其中,  $D_i$  为与节点  $i$  相连接的边的数目;  $V$  为与节点  $i$  相邻的所有节点集合;  $P_i$  为节点  $i$  流入的实际功率。

线路度数  $D_k$  反映了线路在配电网局部结构上的脆弱度,主要与其两端相连的节点有关,且节点考虑了其所连边的数目、相邻节点及输入功率的影响。该指标数值越大,则线路的脆弱度越高。

### 1.2 线路介数 $B_k$

线路度数考虑的是线路在配电网局部结构的重要程度,而对于配电网脆弱线路辨识而言,不仅要考虑局部结构的影响,也要考虑全局结构的影响,因此提出了反映线路在配电网全局结构中脆弱度的线路介数  $B_k$ ,其定义为:

$$B_k = P_k \sum_{i \in G, j \in L} |\sqrt{P_i P_j} Z_{ij}(k)| \quad (5)$$

其中,  $P_k$  为线路  $k$  实际传输的有功功率;  $G$  和  $L$  分别为配电网母线节点集和负荷节点集;  $i$  和  $j$  分别为母线节点和负荷节点;  $P_i$  和  $P_j$  为相应的节点有功功率;  $Z_{ij}(k)$  为单独在母线节点  $i$  及负荷节点  $j$  之间施加单位电源时线路  $k$  输送的有功功率值。

传统的边介数指系统中某条边被任意两节点之间的最短路径经过的次数。配电网大多为辐射状网络且规模比输电网小,因此在输电网介数中所使用的最短路径在配电网中并不适用,故提出了  $Z_{ij}(k)$  来替代最短路径,通过  $Z_{ij}(k)$  能

比较直观地认识到线路  $k$  在配电网中所承担的输电任务轻重。台风会造成配电网的负荷缩减,比如工厂停工、学校放假等,这会导致系统功率发生变化。因此台风灾害下不仅考虑线路在配电网全局结构中所承担的输电任务的轻重,也考虑了母线功率、负荷功率及线路输送功率,使得线路指标更加完善。线路介数指标越大,该线路的脆弱度越高。

### 1.3 线路失效率 $F_k$

Batts 台风模型是目前发展较为成熟的风场模型,曾用于美国沿海建筑设计,具有很高的准确性,因而本文选取 Batts 台风模型进行计算。

据统计,台风灾害下受风吹而直接断线的概率很低,这种情况基本可以忽略,造成线路事故的主要原因是电杆故障<sup>[14 15]</sup>。基于气象部门数据和地理信息系统(geographic information system, GIS)预测台风路径,根据台风中心和电杆的位置来确定电杆处的风速值。其中,台风最大风速半径  $R_{\max}$  为

$$R_{\max} = e^{(-0.123 \ 9 \Delta P^{0.600 \ 3} \ 5.103 \ 4)} \quad (6)$$

其中,台风中心气压差  $\Delta P = 1 \ 010 - P_c$ ,  $P_c$  为台风中心压强,单位为 hPa。

台风条件下模拟圆上电杆  $s$  处的风速大小  $v_s$  为:

$$v_s = \begin{cases} \frac{v_{R_{\max}} r_s}{R_{\max}}, & r_s \leq R_{\max} \\ v_{R_{\max}} \left(\frac{R_{\max}}{r_s}\right), & r_s > R_{\max} \end{cases} \quad (7)$$

$$v_{R_{\max}} = 0.865(K \sqrt{\Delta P} - 0.5R_{\max}f_w) + 0.5v_T \quad (8)$$

其中,  $v_{R_{\max}}$  为台风最大风速半径处的风速;  $r_s$  为电杆  $s$  距台风中心的距离; 常系数  $K = 6.72$ ;  $f_w$  为地球自转科氏参数;  $v_T$  为台风移动速度。

采用指数型曲线函数来拟合电杆  $s$  的失效率  $\gamma_s$  与电杆  $s$  所处位置的风速  $v_s$  的关系:

$$\gamma_s = \begin{cases} 0, & 0 \leq v_s \leq v_{\min} \\ e^{H(v_s - 2v_{\min})}, & v_{\min} < v_s \leq 2v_{\min} \\ 1, & 2v_{\min} < v_s \end{cases} \quad (9)$$

其中,  $v_{\min}$  为电杆设计风速;  $H$  为模型系数,取值为  $0 \sim 0.4$ 。

由于每条线路配有若干杆塔,根据串联系统可靠性评估理论,可得到线路  $k$  的失效率为:

$$F_k = 1 - \prod_{s=1}^{N_k} (1 - f_s) \quad (10)$$

$$f_s = 1 - e^{-\frac{\gamma_s}{1-\gamma_s}} \quad (11)$$

其中,  $N_k$  为输电线路  $k$  上电杆数量;  $f_s$  为配电线路上第  $s$  个电杆的故障率。

配电线路同配电变压器、断路器等一样,是配电网的一类设备。失效率是从配电网设备层面出发的局部量指标,考虑电杆受台风影响发生倒塌而引起的断线故障,反映了

台风条件下设备的实时状态。线路的失效率指标越大,其脆弱度越高。

### 1.4 线路损失度 $L_k$

配电网线路损失度  $L_k$  以线路故障时配电网资产损失成本来衡量线路在配电网中的重要程度。线路损失度  $L_k$  定义为

$$L_k = U_k Q_k \quad (12)$$

其中,  $U_k$  表示线路故障时损失的单位成本,单位为万元/(MW·h),  $Q_k$  是由线路故障所造成的故障负荷节点的负荷量(MW)。根据负荷点类型与重要程度划分,其平均单位电量损失可以区别为两类,分别为  $0.57$  元/(kW·h) 和  $0.79$  元/(kW·h)<sup>[16]</sup>。

损失度是一个全局量指标,以设备故障所造成的配电网的经济损失为依据,反映设备在配电网中的脆弱度。线路的损失度指标越大,其脆弱度越高。

## 2 指标的处理及分析

在获得了以上 4 项指标的基础上,为了便于后续分析,需要对各指标进行处理和分析。首先,对各指标进行归一化处理,将它们统一到同一数量级下;然后,对各指标权重进行科学的计算,进而获得综合评价指标。

### 2.1 指标的归一化处理

选取每项指标中最大值与最小值的差值作为基准值,每项数据与最小值的差值除以基准值得到归一化后的指标<sup>[17]</sup>,其值为:

$$x_{\text{norm}} = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (13)$$

其中,  $x_{\text{norm}}$  为归一化后的指标值,  $x$  为原始指标指,  $x_{\max}$  和  $x_{\min}$  分别为原始指标值中的最大值和最小值。

### 2.2 指标权重的确定

本文从主客观两个角度出发,综合采用熵权法及层次分析法对各项指标进行赋权,以衡量各项指标在辨识脆弱线路时所起的作用大小。这不仅反映了配电网自身的客观条件,而且能体现出决策者对不同属性的重视程度,可以有效避免仅采用主观或客观方法所存在的不足。

熵是对系统无序状态的一种度量,系统的熵越大则有秩序程度越低,熵越小则有序程度越高。熵权法的评估特点是对象的指标值相差越大,该对象越重要,权重值越大。熵权法确定各指标的权重系数步骤如下<sup>[18-19]</sup>:

1) 对判断矩阵  $\mathbf{T} = (t_{ij})_{m \times n}$  进行归一化处理,得到标准矩阵  $\mathbf{E} = (e_{ij})_{m \times n}$ :

$$e_{ij} = \frac{t_{ij}}{\sum_{j=1}^n t_{ij}} \quad (14)$$

其中,  $m$  为配电网线路数目;  $n$  为指标个数;  $t_{ij}$  为第  $j$  个指标下第  $i$  条线路的初始数据;  $e_{ij}$  为第  $j$  个指标下第  $i$  条线路的指标的比重。

2) 计算第  $j$  个指标的熵  $H_j$  :

$$H_j = -K \sum_{i=1}^n e_{ij} \ln e_{ij} \quad (15)$$

其中,  $K = (\ln n)^{-1}$  为熵系数。

3) 计算第  $j$  个指标的熵权系数  $w_j$  :

$$w_j = \frac{1 - H_j}{n - \sum_{j=1}^n H_j} \quad (16)$$

熵权法仅从客观角度来确定各指标权重,无法全面对指标的脆弱度进行描述,因此还考虑了主观角度的层次分析法。层次分析法可将定量和定性分析结合起来,对各指标的实际认识定量化。层次分析法确定各指标的权重系数的步骤如下<sup>[20-21]</sup> :

1) 评估指标两两对比,构造比较矩阵  $B$  :

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 1/3 & 1/3 \\ 2 & 1 & 1/2 & 1/2 \\ 3 & 2 & 1 & 1 \\ 3 & 2 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

2) 一致性检验。一致性指标  $CI = (\mu - n) / (n - 1)$ , 一致性比率  $CR = CI / RI$ 。其中  $\mu$  为判断矩阵  $B$  的最大特征值;  $n$  为指标个数;  $RI$  为随机一致性指标, 本文取值为 0.9。

若  $CI = 0$ , 则有完全的一致性, 若  $CI \approx 0$ , 则有满意的一致性,  $CI$  越大, 不一致越严重。当  $CR < 0.1$  时, 认为  $B$  有满意的一致性, 通过一致性检验, 可用其归一化特征向量作为权向量; 若  $CR \geq 0.1$ , 则  $B$  的一致性检验不通过, 要重新构造对比矩阵  $B$ 。经计算, 本文一致性比率  $CR = 0.0038 < 0.1$ , 满足一致性检验。

3) 计算比较矩阵  $B$  的最大特征值  $\mu$  对应的特征向量并归一化处理, 形成权向量  $\varphi$  为:

$$\varphi = (0.1091, 0.1891, 0.3509, 0.3509)^T \quad (18)$$

权向量  $\varphi$  中的每一元素对应度数、介数、失效率和损失度的主客观权重系数。

### 2.3 综合脆弱度指标的确定

综合主观和客观权重共同的作用, 得到综合权重系数为

$$\varepsilon_j = \frac{w_j + \varphi_j}{\sum_{j=1}^n (w_j + \varphi_j)} \quad (19)$$

将综合权重系数代入各单项指标, 得到综合脆弱度指标为

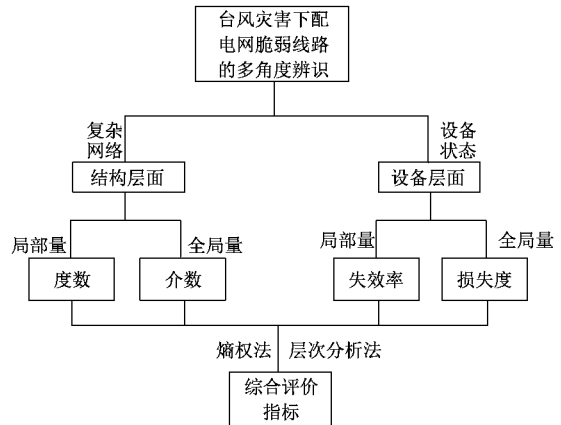
$$C = \varepsilon_1 D_k + \varepsilon_2 B_k + \varepsilon_3 F_k + \varepsilon_4 L_k \quad (20)$$

其中,  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$  分别为配电线路度数、介数、失效率和损失度的综合权重系数。线路的综合脆弱度越大, 则表明其在配电网中的重要度越高, 在台风灾害下故障造成的影响越严重。

### 3 算例分析

台风灾害下配电网脆弱线路的辨识体系如图 1 所示,

该辨识体系首先从配电网结构层面和设备层面出发, 然后充分考虑局部及全局多角度影响因素, 提出了 4 项单项评价指标, 最后采用熵权法和层次分析法得到综合评价指标, 使辨识结果更加全面、可靠。



采用 IEEE RBTS BUS6 F4 馈线系统算例对本文所提出的方法进行验证, 如图 2 所示。IEEE 原始数据中提供了该系统的拓扑结构、潮流分布、设备参数等信息, 详细参数见文献<sup>[22-24]</sup>。忽略台风强度的衰减, 假定台风登陆时  $P_c = 985 \text{ hpa}$ ,  $v_{\min} = 30 \text{ m/s}$ ,  $v_T = 5.6 \text{ m/s}$ ,  $H = 0.1$ 。根据《配电网运行规程》<sup>[25]</sup>, 取 35 kV 配电网线路电杆的平均档距为 300 m。计算经济损失度时, 设配电线路故障修复时间为 24 h。

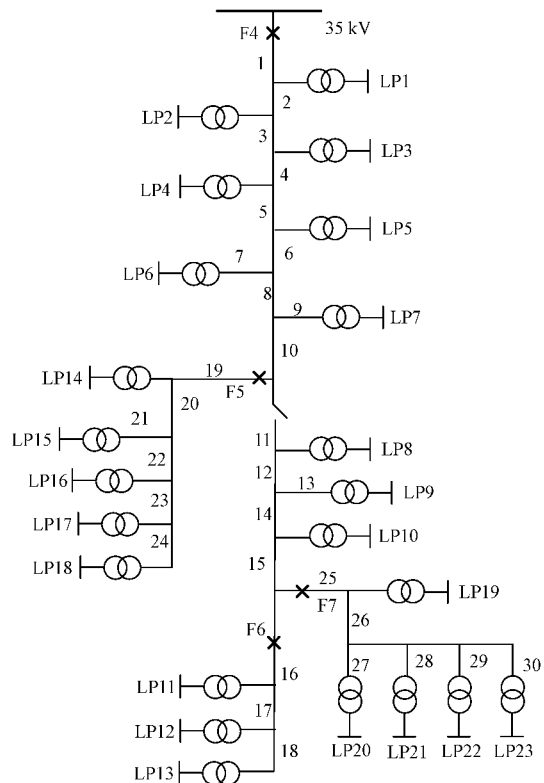


图 2 IEEE RTBS BUS6 F4 馈线系统结构图

### 3.1 单项评价指标

根据式(3)~(12),通过计算可得线路的单项脆弱度指标值,如图3中的(a)~(d)所示,其中的横坐标对应于图2中的各线路,纵坐标为归一化后的单项脆弱度指标值。因为图2(b)中线路16~30的介数与线路1~15的差距较大,所以原图中线路16~30的数据对比不明显,为了便于观察分析,在右上角小图中展示线路16~30的介数数值。由计算所得的单项评价指标数值,按从大到小的原则进行对比排序,并列出了其中排名前10的线路,如表1所示。

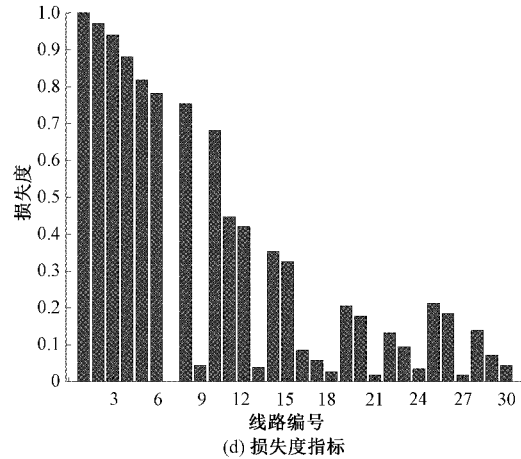
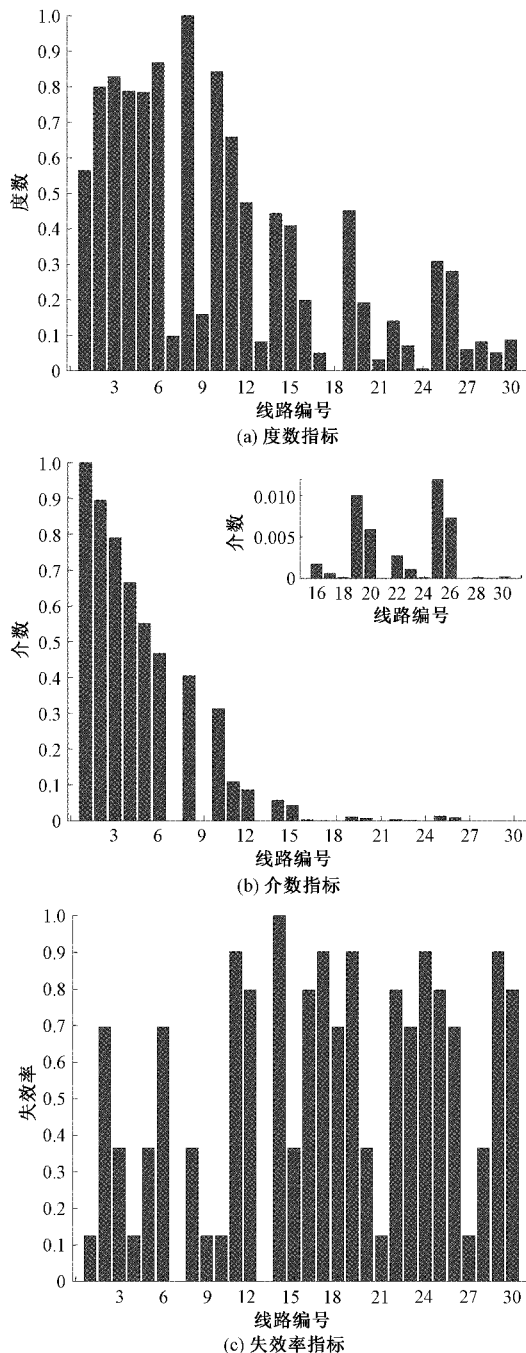


图3 IEEE RTBS BUS6 F4 馈线系统线路脆弱度指标

表1 IEEE RTBS BUS6 F4 馈线系统线路脆弱度指标排序

序号	按度数 排序	按介数 排序	按失效率 排序	按损失度 排序
1	8	1	14	1
2	6	2	11	2
3	10	3	17	3
4	3	4	19	4
5	2	5	24	5
6	4	6	29	6
7	5	8	12	8
8	11	10	16	10
9	1	11	22	11
10	12	12	25	12

由图3和表1可以看出,度数、介数、失效率和损失度的排序结果具有各自特点,这是因为它们从不同的角度来反映线路脆弱度状况。

度数着重于线路在局部结构的重要度,与线路两端节点的紧密程度及所连线路数量有关,而处于系统分支处附近的节点与其它节点相比所连线路多且紧密度高,因此与其相连线路(如线路8、6、10)的度数较其它线路而言更大。失效率着重于反映台风场景下线路的故障率,其值大小与台风强度及电杆数量正相关,而电杆数量又与线路长度正相关,故失效率与线路长度正相关,长度较长的线路(如线路14、11、17)失效率高。介数反映线路在系统全局结构的重要度,其与线路在配电网中承担的输电任务轻重相关,位于系统上游位置及主干线上的线路与其它位置的线路相比承担的输电任务更重,因而这些线路(如线路1、2、3、4)的介数更大。损失度反映线路故障后所造成的负荷缩减及经济损失,位于系统上游位置及主干线上的线路发生故障所造成的负荷削减及经济损失更高,因此这些线路(如线路1、2、3、4)的损失度更高。

3.2 综合评价指标

根据第 2 节熵权法确定各指标权重系数的步骤,可求得 4 项指标的客观权重,分别为  $\omega_1 = 0.243 1, \omega_2 = 0.186 3, \omega_3 = 0.296 5, \omega_4 = 0.274 1$ 。此客观权重结合前文所求主观权重可得综合权重,分别为  $\epsilon_1 = 0.176 1, \epsilon_2 = 0.187 7, \epsilon_3 = 0.323 7, \epsilon_4 = 0.312 5$ 。

依据所求综合权重并结合式(20)计算配电网中所有线路的综合脆弱度,如图 4 所示,其中的横坐标对应于图 2 中的各线路,纵坐标为归一化后的综合脆弱度指标值。由计算所得综合脆弱度指标值,按从大到小的原则进行对比排序,并列其中排序为前 15 位的线路,如表 2 所示。

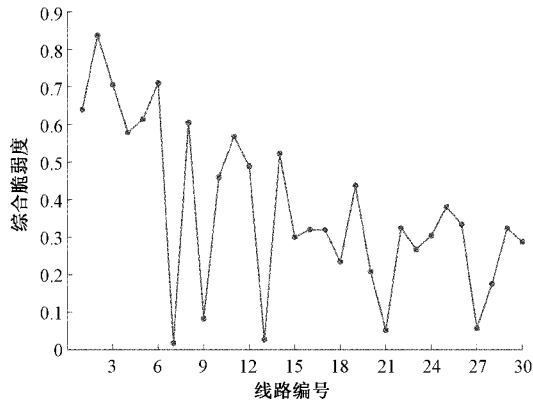


图 4 IEEE RTBS BUS6 F4 馈线系统综合脆弱度指标

表 2 IEEE RTBS BUS6 F4 馈线系统线路综合脆弱度指标排序

序号	综合脆弱度排序
1	2
2	6
3	3
4	1
5	5
6	8
7	4
8	11
9	14
10	12
11	10
12	19
13	25
14	26
15	22

由表 2 和图 4 并结合图 2 的系统结构图可以看出,位于系统上游位置处(如线路 2、6、3、1、5、8、4)、主干线(如线路 11、14、12)、分支处(如线路 10、19、25、26)的线路及长度较长的线路(如线路 22)在台风灾害下的脆弱度较高。根

据以上分析,度数、介数、失效率和损失度指标各自辨识的脆弱线路在综合结果中皆有体现且主次分明,由此可知这 4 项指标是互补的,且综合评估结果合理有效。在台风来临前的一段时间内,对本文方法所确定的脆弱线路进行加固,可以降低配电网发生故障的概率,提高配电网的运行可靠性。

3.3 辨识方法的对比

选取综合脆弱度排在前 15 的线路,将其与采用文献[5]和文献[26]中方法所求得的结果进行比较,如表 3 所示。

表 3 台风灾害下配电网脆弱线路辨识结果比较

线路排序	本文方法	文献[5]方法	文献[26]方法
1	2	1	2
2	6	2	6
3	3	3	3
4	1	4	14
5	5	5	1
6	8	6	11
7	4	8	19
8	11	10	8
9	14	11	12
10	12	12	5
11	10	14	25
12	19	15	22
13	25	25	16
14	26	19	4
15	22	26	17

本文与文献[5]相比,识别出了 14 条相同的脆弱线路,识别结果基本相似但排序略有不同,原因在于二者辨识方法所考虑的因素存在差异。文献[5]主要从拓扑结构及运行状态改变对系统带来的冲击效应来辨识脆弱线路,其重点在于系统层面而未曾考虑设备状况及故障所造成的损失。本文的辨识方法则考虑了以上因素的影响,避免了仅从系统角度出发所引起的不足。线路 22 是本文辨识出的脆弱线路而不是文献[5]辨识出的脆弱线路,线路 15 是文献[5]辨识出的脆弱线路而不是本文辨识出的脆弱线路。线路 22 虽然在网络结构及故障损失上的脆弱度要低于线路 15,但当台风灾害发生时,线路 22 的失效率却是线路 15 的两倍之多,因此综合考虑以上因素,线路 22 的脆弱度要高于线路 15。

文献[26]与本文共识别出了 13 条相同的脆弱线路,识别结果基本相似但排序略有不同,原因亦为二者辨识方法所考虑的因素不同。文献[26]主要从拓扑结构及线路故障所造成的过负荷风险来辨识脆弱线路,其同样忽略了设备状况及相应的经济损失。线路 10、26 是本文辨识出的脆弱

线路而不是文献[26]辨识出的脆弱线路,线路 16、17 是文献[26]辨识出的脆弱线路而不是本文辨识出的脆弱线路。与线路 26 相比,文献[26]所辨识出的线路 16、17 虽然失效率较高,但其故障所造成的经济损失低,二者相加的总经济损失也不及线路 26,因此综合来看,线路 26 的脆弱度要高于线路 16、17;线路 16、17 的失效率虽然远高于线路 10,但其它指标远低于线路 10,因此综合来看,线路 10 的脆弱度明显要高于线路 16、17。

通过与文献[5]和文献[26]的对比,台风灾害下本文的辨识方法更为有效。

#### 4 结 论

为了降低台风灾害下配电线路的故障率,提高配电网的安全运行水平,本文提出了一种多角度辨识台风灾害下配电网脆弱线路的方法。该方法从配电网结构层面和设备层面出发,充分考虑局部和全局的多角度要素,并结合层次分析法和熵权法,构建了台风灾害下配电网脆弱线路辨识体系,克服了仅从结构层面出发,考虑较为单一影响因素的局限性。IEEE RTBS BUS6 F4 馈线系统的研究表明:本文方法能更加全面、准确地辨识出处于配电网的拓扑结构重要位置、承担输电任务重、台风灾害下故障率高、故障经济损失高的线路,对配电网的灾害防御及提高系统运行可靠性具有重要意义。现实中台风灾害的到来也往往伴随着暴雨,这也意味着配电网脆弱线路的辨识可能需要考虑台风和暴雨的综合作用,需要更进一步的研究。

#### 参考文献

- [1] 苏盛,陈金富,段献忠. 全球暖化与电力系统的相互影响综述[J]. 电网技术,2010,34(2):33-40.
- [2] 邱王泽禾,章蓝文. 1917 号台风“塔巴”对浙江沿海风场的影响及其成因分析[J]. 应用海洋学学报,2021,40(2):332-341.
- [3] 闫绪娴,范玲,阮嘉珺. “一带一路”沿线国家台风灾害关联经济损失研究——以 2018 年“山竹”台风灾害为例[J]. 灾害学,2021,36(1):7-12, 23.
- [4] 李健,侯一筠,刘清容,等. 台风“利奇马”对渤海风暴潮影响研究[J]. 海洋预报,2021,38(1):35-43.
- [5] 孙顺祥,李晓明,张繁碧,等. 基于网络结构重要度和安全隐患脆弱度的配电网脆弱线路辨识[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(14):107-113.
- [6] 梁颖,方瑞明,卢小芬,等. 基于复杂网络理论的电力系统脆弱线路辨识研究现状[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(20):151-155.
- [7] 杨丽徙,曾新梅,方强华,等. 基于抗毁性分析的中压配电网网络拓扑结构[J]. 电力系统自动化,2013,37(8):65-69.
- [8] 刘小丽,毛弋,梁杉,等. 基于综合介数的电网脆弱线路辨识[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(2):116-121.
- [9] 曹煜,郭创新,章禹,等. 计及无功潮流影响的传输介数概念及其电网关键线路辨识研究[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(23):9-16.
- [10] 沈瑞寒,刘涤尘,赵洁,等. 基于加权网络模型的电网潮流转移下危险线路识别[J]. 电网技术,2012,36(5):245-250.
- [11] 李勇,刘俊勇,刘晓宇,等. 基于潮流熵测度的连锁故障脆弱支路评估及其在四川主干电网中的应用[J]. 电力自动化设备,2013,33(10):40-46.
- [12] 王涛,高成彬,顾雪平,等. 基于功率介数的电网关键环节辨识[J]. 电网技术,2014,38(7):1907-1913.
- [13] 李美成,梅文明,刘永强,等. 基于改进负载潮流熵指标准确辨识电网脆性支路的方法[J]. 电网技术,2019,43(3):1026-1033.
- [14] ATWAY M, EI-SAADANYE F, GUISEA C. Supply adequacy assessment of distribution system including wind-based DG during different modes of operation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(1):78-86.
- [15] CASSOLA F, BURLANDO M. Wind speed and wind energy forecast through Kalman filtering of numerical weather prediction model output[J]. Applied Energy, 2012, 99(2):154-166.
- [16] 史常凯,宁昕,孙智涛,等. 基于设备实时健康指数的配电网风险量化评估[J]. 高电压技术,2018,44(2):534-540.
- [17] 邢方方,惠向晖. 基于 seq2seq 模型的室内 WLAN 定位方法[J]. 电子测量与仪器学报,2020,34(11):93-100.
- [18] 廖俊,于雷,周中良,等. 机载相控阵雷达探测参数优化[J]. 仪器仪表学报,2012,33(11):2487-2494.
- [19] 陈宏,上官霞,郑钟,等. 基于营配数据融合的配电网运行状态评估的研究[J]. 国外电子测量技术,2019,38(4):111-115.
- [20] 王伟贤,李钟慎. 改进层次分析法在柱上变压器状态评价的应用[J]. 电子测量技术,2020,43(6):38-42.
- [21] 林静,王海忠,贾碧州. 基于改进层次分析法的电力营销状态评估及预警模型研究[J]. 国外电子测量技术,2020,39(1):19-25.
- [22] 李蕊,徐浩,蔡杰,等. 计及分块和层级结构融合的配电系统可靠性评估[J]. 电网技术,2015,39(2):494-499.
- [23] RAHMAN M H, XU L, YAO L Z. Protection of large partitioned MTDC networks using DC-DC converters and circuit breakers[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1):170-178.
- [24] 李琳,穆云飞,殷自力,等. 基于台风场景模拟的配电网架空线路薄弱环节辨识方法[J]. 电力自动化设备,2020,40(5):150-157.
- [25] 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.

- [26] 史文超,李晓明,王孝琳,等. 配电网脆弱性评估方法[J].  
电力系统及其自动化学报,2018,30(12):125-131.

#### 作者简介

李扬,硕士研究生,主要研究方向为配电网脆弱性评估及

薄弱环节辨识。

E-mail:xueshengliyang@163.com

赵艳雷(通信作者),博士,教授,博士生导师,主要研究方  
向为电力电子与新能源发电技术,电力系统分析等。

E-mail:zhaoyanlei01@163.com