

文章编号:1000-5862(2020)05-0489-06

架空输电线路杆塔涉鸟故障风险等级评估

李阳林¹, 况燕军¹, 石大寨², 张宇¹, 邱志斌², 胡京¹, 王佳³, 毛宇文⁴

(1. 国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 江西 南昌 330096; 2. 南昌大学能源与电气工程学院, 江西 南昌 330031;
3. 国网九江供电公司, 江西 九江 443002; 4. 国网江西省电力有限公司, 江西 南昌 330077)

摘要:为提高架空输电线路涉鸟故障防治措施的精准性,对江西电网2005—2019年期间的337起涉鸟故障进行统计分析,提取电压等级、杆塔类型、导线排列方式及绝缘子串型等杆塔结构特征,以及农田、水库、林区、河流和鸟类迁徙通道等地理环境特征。根据统计结果计算不同杆塔结构特征对涉鸟故障的影响度,拟合地理环境特征指标值与杆塔距离的关系式,分别采用层次分析法与熵值法计算这2类特征各个指标的权重系数,运用线性加权法构建输电线路涉鸟故障风险等级的量化评估模型。基于历史故障数据,划分出杆塔涉鸟故障的风险等级,通过评估算例验证了模型的合理性。研究结果有助于实现电网涉鸟故障的差异化防治,进而降低输电线路的跳闸率。

关键词:架空输电线路;涉鸟故障;地理环境;杆塔结构;综合评价法;风险评估

中图分类号:TM 754 **文献标志码:**A **DOI:**10.16357/j.cnki.issn1000-5862.2020.05.07

0 引言

随着中国生态环境的改善,鸟类数目逐渐增多,频繁的鸟类活动给架空输电线路的安全稳定运行带来了严重威胁^[14]。近年来,各地区均多次发生涉鸟故障导致的线路跳闸事件^[5-7],鸟类繁衍与线路安全运行的矛盾日益突出。据统计,因涉鸟故障引起的跳闸次数占输电线路跳闸总数的10%以上,鸟类活动已成为引起输电线路跳闸的第3大原因^[8-10]。针对性地防治涉鸟故障已成为保障电网安全运行必须开展的工作之一。

目前,架空输电线路的涉鸟故障防治工作主要包括2个部分:(i)划分输电线路涉鸟故障风险等级,绘制风险分布图;(ii)根据风险分级结果对杆塔加装相应的防鸟装置。涉鸟故障风险分布图的绘制和风险等级的划分主要依据DL/T 1570—2016^[11]和GB/T 35695—2017^[12]进行,并已在各省电网中得到了广泛应用^[13-15]。对于不同风险等级的架空输电线路,分别采取不同的防鸟措施。目前,防鸟刺、防鸟盒、防鸟罩、防鸟挡板等各类装置在输电线路运行中得到了广泛应用,但仍存在较大盲目性,未能有效

抑制输电线路涉鸟故障的上升趋势,因防鸟装置失效引起的输电线路跳闸故障也时有发生,运行单位缺乏精准化的涉鸟故障防治措施。

现有的输电线路涉鸟故障风险分布图的绘制主要考虑了地理环境和鸟类活动,未能考虑输电线路杆塔结构特征,因而不能对逐基杆塔进行差异化的涉鸟故障防治。为了弥补这一缺陷,部分学者尝试将输电线路电压等级、杆塔类型等因素作为风险评估指标,综合评估输电线路的涉鸟故障风险,在有限样本条件下开展了初步研究^[16-18]。本文综合分析了江西电网2005—2019年间337起发生涉鸟故障跳闸杆塔的基本信息,建立了一种基于综合评价法^[19]的风险等级评估模型。该评估模型从杆塔自身出发,综合考虑了农田、水库等地理环境特征及杆塔结构特征,可与鸟害风险区域分布图相结合,为电网运维人员有针对性地预防涉鸟故障提供指导性建议。

1 江西电网涉鸟故障规律分析

在2005—2019年间,江西电网110 kV及以上输电线路共发生涉鸟故障337起,统计发现电压等级、杆塔类型、导线排列方式等杆塔结构特征及农

收稿日期:2020-03-14

基金项目:国网江西省电力有限公司科技课题(52182018000W)资助项目。

作者简介:李阳林(1983-),男,江西奉新人,高级工程师,主要从事输变电设备状态评价及其与鸟类的关系研究。E-mail: 33478255@qq.com

田、水库、林区等地理环境特征对涉鸟故障的发生有一定的影响。

1.1 杆塔结构特征

将江西电网 337 起涉鸟故障按电压等级、杆塔类型、导线排列方式及绝缘子串型进行统计。电压等级考虑 110 kV、220 kV 和 500 kV,杆塔类型包括直线塔和耐张塔,导线排列方式分别为三角形排列、水平排列和垂直排列,绝缘子串型主要考虑直线串和 V 串。为了科学地反映出各个杆塔结构特征对涉鸟故障发生概率的影响,将各结构特征的故障占比与实际占比的比值作为其对涉鸟故障的影响度,统计结果如表 1 所示。

表 1 杆塔结构特征对涉鸟故障的影响度

杆塔结构特征	故障杆塔基数	故障占比/%	实际占比/%	影响度
电压等级/kV	110	206	61.13	54.75
	220	114	33.83	35.04
	500	17	5.04	10.21
杆塔类型	直线塔	247	73.29	71.76
	耐张塔	90	26.71	28.24
导线排列方式	三角形	200	59.34	56.13
	水平	124	36.80	33.92
	垂直	13	3.86	9.95
绝缘子串型	直线串	326	96.74	96.82
	V 串	11	3.26	3.18

由表 1 可知,110 kV 的输电线路杆塔发生涉鸟故障最多,且该电压等级的杆塔对涉鸟故障概率的影响度最大。在实际运行中,电压等级越低、绝缘子串绝缘距离越短,就越容易因鸟巢材料或鸟粪短接绝缘间隙而造成线路跳闸。对于杆塔类型和导线排列方式而言,直线塔较耐张塔更易发生涉鸟故障;导线水平排列与三角形排列方式对涉鸟故障的影响度相当,均高于垂直排列方式。

不同类型的绝缘子串型对涉鸟故障的影响具有明显差异。直线串杆塔发生涉鸟故障次数较多,但 V 串绝缘子对涉鸟故障的影响度更大。V 串绝缘子的杆塔更易发生涉鸟故障的原因有 2 点:(i) 鸟粪在下落的过程中呈散状,而 V 串绝缘子本身又是倾斜排列的,表面更容易堆积鸟粪;(ii) V 串绝缘子带有一定的张角,便于大型鸟类站立停留。

1.2 地理环境特征

将 337 起涉鸟故障杆塔的经纬度导入 Google Earth 中,统计各起涉鸟故障的地理环境特征,发现农田、水库、林区、河流和鸟类迁徙通道特征对涉鸟故障的发生有一定影响,这 5 种地理特征发生涉鸟故障的杆塔数及故障占比统计结果如表 2 所示。

表 2 涉鸟故障杆塔地理特征分布

地理环境	农田	水库	林区	河流	鸟类迁徙通道
故障杆塔数	162	72	44	39	20
故障占比/%	48.07	21.36	13.06	11.57	5.94

2 涉鸟故障风险量化评估指标

涉鸟故障风险量化评估是一个综合评价的过程,具体考虑了杆塔结构特征和地理环境特征构成的 3 级指标体系。将杆塔结构与地理环境作为风险量化评估的 1 级指标。其中杆塔结构特征包括电压等级、杆塔类型、导线排列方式及绝缘子串型 4 个 2 级指标;而地理环境特征包括农田、水库、林区、河流及鸟类迁徙通道 5 个 2 级指标。此外,杆塔结构特征的 4 个 2 级指标还分别包含各自的 3 级指标,电压等级分别为 110 kV、220 kV 和 500 kV,杆塔类型包含直线塔和耐张塔,导线排列方式分别为三角形排列、水平排列和垂直排列,绝缘子串型包括直线串和 V 串。

2.1 杆塔结构特征指标值

杆塔结构特征的指标值可由各 2 级指标对应的 3 级指标对涉鸟故障的影响度进行归一化得到^[16]。经归一化处理后,指标值均为区间 $[0,1]$ 上的小数,计算结果如表 3 所示。

表 3 杆塔结构特征评估指标值

评估指标名称	代表符号	评估指标值
电压等级/kV	110	v_1
	220	v_2
	500	v_3
杆塔类型	直线塔	t_1
	耐张塔	t_2
导线排列方式	三角形排列	a_1
	水平排列	a_2
	垂直排列	a_3
绝缘子串型	直线串	s_1
	V 串	s_2

2.2 地理环境特征指标值

地理环境特征指标值的计算需根据故障点到各地理环境的距离 l_i 与地理环境特征指标值之间的关系,应选择合适的函数拟合 2 者之间的关系式。对于已发生的故障,地理环境特征指标值的计算公式为

$$g_i = 1 - p_{im}, \quad (1)$$

其中 g_i 为地理环境特征指标值, $i = 1, 2, \dots, 5$, 分别对应农田、水库、林区、河流和鸟类迁徙通道这 5 种地理环境; p_{im} 为杆塔与第 i 种地理环境之间距离为 l_{im} 时发生涉鸟故障次数所占该类地理环境涉鸟故

障总数的累积百分比,即对于某一种地理环境,设故障杆塔与其距离为 l_{ix} ($x = 1, 2, \dots, m, \dots, n$), 当在距离为 l_{ix} 时,发生涉鸟故障频数占该地理特征涉鸟

故障总数的百分比为 p'_{ix} , 则 $p_{im} = \sum_{x=1}^m p'_{ix}$.

根据(1)式计算162起地理环境为农田的涉鸟故障地理特征指标值 g_1 . 将农田指标值 g_1 及故障杆塔与农田的距离 l_1 进行函数关系拟合,选取确定系数 R^2 接近于1、误差平方和SSE接近于0的函数关系式作为农田指标值的计算公式,拟合曲线如图1所示.

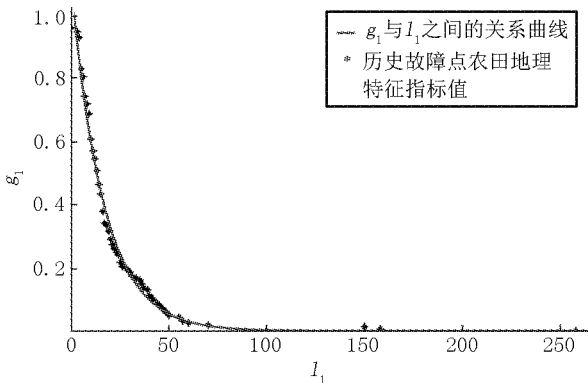


图1 农田特征指标值 g_1 与距离 l_1 之间的拟合曲线

在已发生的涉鸟故障中,杆塔与农田之间最大的距离为258 m,表明当二者距离 $l_1 \geq 258$ m时,该杆塔的农田指标值为0.可见, g_1 的计算式应为一个分段函数,当 $0 \leq l_1 < 258$ m时, g_1 根据上述拟合公式进行计算,当 $l_1 \geq 258$ m, $g_1 = 0$ 时, $g_1 = e^{-0.0543l_1}$ ($0 \leq l_1 < 258$ m).

参照上述方法,可依次拟合出水库、林区、河流、鸟类迁徙通道特征指标值 $g_2 \sim g_5$ 在各自的距离分界点之内的计算式为

$$g_2 = e^{-0.0134l_2} (0 \leq l_2 < 1109 \text{ m}),$$

$$g_3 = 0.78e^{-0.1000l_3} + 0.22e^{-0.2200l_3} (0 \leq l_3 < 172 \text{ m}),$$

$$g_4 = 0.79e^{-0.0329l_4} + 0.2e^{-0.0048l_4} (0 \leq l_4 < 1800 \text{ m}),$$

$$g_5 = 1.31 \times 10^{-8}l_5^4 - 5.55 \times 10^{-6}l_5^3 + 7.12 \times 10^{-4}l_5^2 - 3.97 \times 10^{-2}l_5 + 1 (0 \leq l_5 < 91 \text{ m}).$$

3 涉鸟故障风险量化评估模型

在涉鸟故障风险量化评估的杆塔结构特征和地理环境特征指标值确定后,还需确定各评估指标的权重系数,然后可利用线性加权法^[20]建立输电线路杆塔涉鸟故障风险的量化评估模型.

3.1 1级指标权重系数

对于地理环境和杆塔结构1级指标,采用专家调查法确定2者的权重.咨询江西电网10位运行经

验丰富的专家,获取1级指标权重系数的建议值.对专家给出的建议值取平均,可得地理环境特征的权重系数 $w_m = 0.72$,杆塔结构特征指标的权重系数 $w_n = 0.28$.

3.2 2级指标权重系数

3.2.1 地理环境特征2级指标权重系数 采用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)计算地理环境特征的2级指标权重系数,AHP是一种定性与定量相结合的多目标决策分析方法^[19],具体步骤如下:

1) 求取各指标相较于其他指标的相对重要性数值 x_{ij} , $x_{ij} = x_i/x_j$, 其中 x_i 为各2级指标所占比例, $i, j = 1, 2, \dots, 5$;

2) 根据求出的相对重要性数值构造判断矩阵 P ,

$$P = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ M & \cdots & M \\ x_{n1} & \cdots & x_{nn} \end{pmatrix};$$

3) 求出判断矩阵每一行元素的几何平均数,将求出的结果写成列向量 \bar{w} ;

4) 对向量 \bar{w} 中的元素进行列归一化得到其权重向量 w ;

5) 对判断矩阵的一致性进行检验.当判断矩阵满足一致性要求时,可认为各项指标权重的分配是合理的;当判断矩阵不一致时,参照文献[22]中的方法对判断矩阵进行调整.

地理环境特征的2级指标权重系数可由AHP法确定,根据表2中的数据构造判断矩阵 P ,5种地理环境特征的重要性排序为农田 > 水库 > 林区 > 河流 > 鸟类迁徙通道.

$$P = \begin{pmatrix} 1.00 & 2.25 & 3.68 & 4.15 & 8.09 \\ 0.44 & 1.00 & 1.64 & 1.85 & 3.60 \\ 0.27 & 0.61 & 1.00 & 1.13 & 2.20 \\ 0.24 & 0.54 & 0.89 & 1.00 & 1.95 \\ 0.12 & 0.28 & 0.45 & 0.51 & 1.00 \end{pmatrix}.$$

计算判断矩阵每一行元素的几何平均数:

$$\bar{w}_1 = \sqrt[5]{1.00 \times 2.25 \times 3.68 \times 4.15 \times 8.09} =$$

$$3.0818,$$

$$\bar{w}_2 = \sqrt[5]{0.44 \times 1.00 \times 1.64 \times 1.85 \times 3.60} =$$

$$1.3688,$$

$$\bar{w}_3 = \sqrt[5]{0.27 \times 0.61 \times 1.00 \times 1.13 \times 2.20} =$$

$$0.8364,$$

$$\bar{w}_4 = \sqrt[5]{0.24 \times 0.54 \times 0.89 \times 1.00 \times 1.95} =$$

$$0.7420,$$

$$\bar{w}_5 = \sqrt[5]{0.12 \times 0.28 \times 0.45 \times 0.51 \times 1.00} =$$

$$0.3779.$$

对列向量 $\bar{w} = (\bar{w}_1 \bar{w}_2 \bar{w}_3 \bar{w}_4 \bar{w}_5)^T$ 归一化处理, 可得权重向量为

$$w = \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ w_4 \\ w_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.4810 \\ 0.2136 \\ 0.1305 \\ 0.1158 \\ 0.0590 \end{pmatrix} \quad (2)$$

根据文献[21]中的方法对判断矩阵 P 的一致性进行检验, 可求得 P 的随机一致性指标 $C_R < 0.1$, 则判断矩阵具有满意的一致性, 说明各地理环境特征权重系数的分配是合理的. 根据(2)式可得农田、水库、林区、河流及鸟类迁徙通道的权重系数分别为 0.4810、0.2136、0.1305、0.1158 和 0.0590.

3.2.2 杆塔结构特征 2 级指标权重系数 采用熵值法计算杆塔结构特征的 2 级指标权重系数, 熵是信息论中量化不确定性程度的量, 熵值与信息量的多少成反比^[23]. 熵值法是一种利用熵值确定权重的客观赋权法, 其具体计算步骤如下:

1) 计算第 j 个指标第 i 个方案所占比例 P_{ij} :

$$P_{ij} = x_{ij} / \sum_{i=1}^n x_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m),$$

其中 x_{ij} 为第 j 个指标第 i 个方案的原始值.

2) 计算第 j 个指标的熵值 e_j :

$$e_j = -k \sum_{i=1}^n P_{ij} \ln(P_{ij}),$$

其中 k 为常数, 与样本数 n 有关, $k = 1/\ln n, n \in \mathbf{N}^*$.

3) 计算第 j 个指标的差异性系数 q_j :

$$q_j = 1 - e_j.$$

4) 计算第 j 个指标的权重 w_j :

$$w_j = q_j / \sum_{i=1}^m q_i \quad (j = 1, 2, \dots, m).$$

采用上述步骤计算杆塔结构特征的 2 级指标权重系数. 首先, 利用表 3 中的数据计算各 3 级指标对于 2 级指标的特征比例 P_{ij} .

$$P_{11} = 0.4335, P_{12} = 0.3749, P_{13} = 0.1916, \\ P_{21} = 0.5192, P_{22} = 0.4808, P_{31} = 0.4179, P_{32} = 0.4288, P_{33} = 0.1533, P_{41} = 0.4936, P_{42} = 0.5064.$$

计算各项指标的熵值 e_j , 可得 $e_1 = 0.9527$, $e_2 = 0.9989$, $e_3 = 0.9241$, $e_4 = 0.9999$.

求取指标的差异性系数 h_j , 可得 $h_1 = 1 - e_1 = 0.0473$, $h_2 = 1 - e_2 = 0.0011$, $h_3 = 1 - e_3 = 0.0759$, $h_4 = 1 - e_4 = 0.0001$.

对差异性系数进行归一化处理, 所得到的值即为杆塔结构特征各个指标的权重系数, 即 $w_v = 0.3802$, $w_t = 0.0088$, $w_a = 0.6101$, $w_s = 0.0009$.

3.3 评估模型

根据计算出的各个风险指标的权重系数, 利用线性加权法构建输电线路涉鸟故障的风险等级评估模型, 其计算公式为

$$D = w_m(w_1g_1 + w_2g_2 + w_3g_3 + w_4g_4 + w_5g_5) + \\ w_n(w_a a_* + w_v v_* + w_t t_* + w_s s_*) = 0.72(0.4810g_1 + \\ 0.2136g_2 + 0.1305g_3 + 0.1158g_4 + 0.0590g_5) + \\ 0.28(0.6101a_* + 0.3802v_* + 0.0088t_* + 0.0009s_*).$$

求取风险指数最大值 D_{\max} 和最小值 D_{\min} , 对涉鸟故障风险评估模型进行归一化处理. 当杆塔与各地理特征之间的距离超过临界值且各杆塔结构特征指标值取最小时, 涉鸟故障风险指数最小. 此时, $g_1 \sim g_5 = 0$, $a_* = 0.1533$, $v_* = 0.1916$, $t_* = 0.4808$, $s_* = 0.4936$, 计算得到 $D_{\min} = 0.05$.

当杆塔与各地理特征之间的距离均取最小值 0 且各杆塔结构特征指标值取最大时, 涉鸟故障风险指数最大. 此时, $g_1 \sim g_5 = 1$, $a_* = 0.4288$, $v_* = 0.4335$, $t_* = 0.5192$, $s_* = 0.5064$, 可计算得到 $D_{\max} = 0.84$. 涉鸟故障风险评估模型为 $D' = (D - D_{\min}) / (D_{\max} - D_{\min}) = (D - 0.05) / 0.79$. 归一化后的结果为

$$D' = 0.4384g_1 + 0.1947g_2 + 0.1190g_3 + \\ 0.1056g_4 + 0.0538g_5 + 0.2162a_* + 0.1348v_* + \\ 0.0032t_* + 0.0004a_* - 0.0633. \quad (3)$$

3.4 涉鸟故障风险等级

根据(3)式可计算出江西电网 2005—2019 年所有发生涉鸟故障跳闸杆塔的风险指数, 绘制涉鸟故障风险指数分布散点图, 结果如图 2 所示.

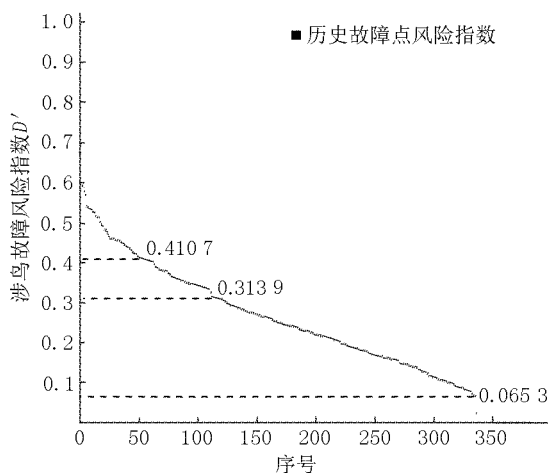


图 2 故障杆塔风险指数分布图

由图 2 可知, 涉鸟故障风险指数在 0.4107、0.3139 和 0.0653 处有明显跨度, 故可将涉鸟故障风险分为 4 个等级, 对于不同的涉鸟故障风险等级, 应采取差异化的防治策略. 各等级的风险指数范围、

风险程度及防治策略如表 4 所示。

4 算例验证

在 2005—2019 年期间,江西电网海彭 II 线第 16 号杆塔、军南线第 32 号杆塔、沙坑线第 1 号杆塔、石洛线第 32 号杆塔、水塘线第 53 号杆塔以及燕潭 I 线第 40 号杆塔均重复发生过涉鸟故障跳闸。采用这 6 基杆塔对涉鸟故障风险等级量化评估模型进行

验证,其基本信息如表 5 所示。

以海彭 II 线第 16 号杆塔为例,计算其涉鸟故障风险指数。该杆塔涉鸟故障风险评估向量为 $(l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, a_*, v_*, t_*, s_*)^T = (5, 125, \geq 172, 513, \geq 91, 0.417\ 9, 0.433\ 5, 0.519\ 2, 0.493\ 6)^T$,可求得涉鸟故障风险指数 $D = 0.459\ 8$,为 IV 级风险。参照相同方法可计算出其他 5 座基杆塔的涉鸟故障风险指数,结果如表 6 所示。

表 4 涉鸟故障风险等级

风险等级	范围	分析结果	防治策略
I	$0 \leq D < 0.07$	涉鸟故障风险较低	开展正常巡视,可选择性安装防鸟装置
II	$0.07 \leq D < 0.31$	涉鸟故障风险低	在正常巡视的同时,根据运行经验对重要线路杆塔、鸟类活动较多杆塔安装防鸟装置
III	$0.31 \leq D < 0.41$	涉鸟故障风险高	涉鸟故障高发期缩短巡视周期,重要线路每基杆塔均安装防鸟装置
IV	$0.41 \leq D \leq 1$	涉鸟故障风险非常高	涉鸟故障高发期缩短巡视周期,线路每基杆塔均安装防鸟装置

表 5 重复发生涉鸟故障跳闸的杆塔信息

杆塔名称	电压等级/ kV	杆塔类型	导线排列方式	绝缘子 串型	农田/m	水库/m	林区/m	河流/m	鸟类迁徙 通道/m
海彭 II 线 16 号	110	直线塔	三角形排列	I 串	5	125	>172	513	>91
军南线 32 号	110	直线塔	三角形排列	I 串	5	125	>172	513	>91
沙坑线 1 号	110	耐张塔	三角形排列	I 串	10	223	>172	>1 800	>91
石洛线 32 号	110	直线塔	三角形排列	I 串	13	256	>172	70	>91
水塘线 53 号	110	直线塔	水平排列	I 串	7	166	>172	918	>91
燕潭 I 线 40 号	220	耐张塔	三角形排列	I 串	104	15	>172	1 390	>91

表 6 涉鸟故障风险等级评估结果

杆塔名称	风险指数	风险等级
海彭 II 线 16 号	0.459 8	IV 级
军南线 32 号	0.229 1	II 级
沙坑线 1 号	0.351 7	III 级
石洛线 32 号	0.334 2	III 级
水塘线 53 号	0.410 7	IV 级
燕潭 I 线 40 号	0.240 0	II 级

从表 6 可知,对于涉鸟故障重复跳闸次数较多的杆塔,风险等级基本在 II 级及以上,这说明本文提出的模型评估结果与实际情况基本一致。通过对每基杆塔的涉鸟故障风险进行量化评估,可针对性地采取不同的防鸟措施。在实际应用中,可将上述模型与涉鸟故障风险分布图相结合,提高风险等级判定的精度,进而降低架空输电线路的涉鸟故障跳闸率。

5 结论

杆塔结构对架空输电线路涉鸟故障具有显著影响,在进行风险评估时,应考虑导线排列方式、电压等级、杆塔类型和绝缘子串型的影响,其中导线排列方式影响最大。不同地理环境对输电杆塔发生涉鸟

故障的影响呈现出明显差异。对江西电网涉鸟故障的影响度排序依次为农田>水库>林区>河流>鸟类迁徙通道。利用本文提出的涉鸟故障风险等级量化评估模型,可根据杆塔结构特征与地理环境特征,准确获取每基杆塔发生涉鸟故障的风险指数,进而可采取差异化的防治策略,降低故障跳闸率。

6 参考文献

[1] 巢亚锋,徐志强,岳一石,等. 湖南输电线路鸟害故障特征分析及防范措施[J]. 高电压技术,2016,42(12): 3853-3860.

[2] 李帆,李阳林,张宇,等. 架空输电线路涉鸟故障分析与防范[J]. 中国电力,2019,52(10):92-99.

[3] 李阳林,徐林,张宇,等. 江西省输电线路常见鸟类习性分析[J]. 江西师范大学学报:自然科学版,2017,41(5):510-515,520.

[4] 李阳林,郭志锋,徐陈华,等. 架空输电线路杆塔黑领椋鸟和喜鹊的巢址选择[J]. 江西师范大学学报:自然科学版,2018,42(6):578-581.

[5] 李长看,卢明,庞锴,等. 河南高压输电线路涉鸟故障防治对策研究[J]. 电瓷避雷器,2015(3):16-22.

- [6] 唐捷,蒋圣超,王乐. 广西电网输电线路鸟害缺陷分析与治理[J]. 电瓷避雷器,2018(5):248-252.
- [7] 李帆,李阳林,张宇,等. 江西电网涉鸟故障分析及防范[J]. 水电能源科学,2018,36(9):172-175.
- [8] 张宇,况燕军,陈铭业,等. 架空输电线路绝缘子在典型鸟粪污染条件下的闪络特性[J]. 高电压技术,2018,44(6):1800-1805.
- [9] 黄道春,余俊,张宇,等. 220 kV 线路悬式绝缘子串异物临近放电机制研究[J]. 中国电机工程学报,2014,34(24):4161-4170.
- [10] 饶斌斌,李阳林,张朝阳,等. 基于小波变换的鸟害隐患电流提取与识别方法[J]. 智慧电力,2019,10(47):120-126.
- [11] 国家能源局. DL/T 1570—2016. 架空输电线路涉鸟故障风险分级及分布图绘制[S]. 北京:中国电力出版社,2016.
- [12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 35695—2017. 架空输电线路涉鸟故障防治技术导则[S]. 北京:中国标准出版社,2017.
- [13] 巢亚锋,徐志强,岳一石,等. 湖南电网架空输电线路涉鸟故障风险分析[J]. 高压电器,2019,55(5):113-118.
- [14] 王晓光,李隆基,周文涛,等. 输电线路涉鸟故障风险分布图的绘制方法与应用[J]. 内蒙古电力,2018,36(3):45-49.
- [15] 李长看,卢明,庞锴,等. 河南输电线路涉鸟故障分布特征及分级研究[J]. 高压电器,2015,51(12):48-54.
- [16] 杨敏祥. 华北电网鸟害成因及等级区划方法研究[D]. 北京:华北电力大学,2011.
- [17] 陈小志. 输电线路鸟害预警模型及系统的设计与实现[D]. 成都:电子科技大学,2014.
- [18] 张俊杰. 内蒙古电网鸟害成因及等级划分的研究[D]. 天津:天津大学,2016.
- [19] 郭亚军. 综合评价理论、方法及应用[M]. 北京:科学出版社,2006.
- [20] 叶义成,柯丽华,黄德育. 系统综合评价技术及其应用[M]. 北京:冶金工业出版社,2006.
- [21] 许树柏. 层次分析法原理[M]. 天津:天津大学出版社,1998.
- [22] 吴诗辉,刘晓东,贾月岭,等. 一种调整 AHP 不一致判断矩阵的优化方法[J]. 控制与决策,2016,31(11):2106-2112.
- [23] 邓红雷,戴栋,李述文. 基于层次分析:熵权组合法的架空输电线路综合运行风险评估[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(1):28-34.

The Risk Grade Assessment of Bird-Related Outages on Overhead Transmission Tower

LI Yanglin¹, KUANG Yanjun¹, SHI Dazhai², ZHANG Yu¹, QIU Zhibin², HU Jing¹, WANG Jia³, MAO Yuwen⁴

(1. State Grid Jiangxi Electric Power Research Institute, Nanchang Jiangxi 330096, China; 2. Department of Energy and Electrical Engineering, Nanchang University, Nanchang Jiangxi 330031, China; 3. State Grid Jiujiang Electric Power Supply Company, Jiujiang Jiangxi 443002, China; 4. State Grid Jiangxi Electric Power Company, Nanchang Jiangxi 330077, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of the prevention measures for bird-related outages on overhead transmission lines, a statistical analysis on 337 bird-related outages of Jiangxi power grid from 2005 to 2019 is conducted. The tower structure features including the voltage level, tower type, conductor arrangement and insulator string type, and the geographical features including farmland, reservoir, forest, river and bird migration passage are extracted. According to the statistical result, the influence degrees of different tower structure features on the bird-related outages are calculated, and the relational expressions between the geographical features and the tower distance are fitted. The weight coefficients of the indexes contained in two kinds of features are calculated using analytic hierarchy process (AHP) and entropy evaluation method, respectively. A quantitative evaluation model is established by the linear weighting method to assess the risk grade of bird-related outages on transmission lines. Based on the historical failure data, the risk grades of bird-related outages are divided. An evaluation example is carried out to verify the rationality of the model. This study contributes to achieve differential prevention of bird-related outages in power grid, thus to reduce the trip-out rate of transmission lines.

Key words: overhead transmission line; bird-related outages; geographical environment; tower structure; comprehensive evaluation method; risk assessment

(责任编辑:刘显亮)