

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210001

多自然灾害下的架空输电线路运行风险评估

宋耐超¹, 王瑞琦¹, 李明明¹, 刘永聪², 申政², 鲁海亮²

(1. 国网河南省电力公司驻马店供电公司, 河南 驻马店 463000;

2. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 为了对多种自然灾害共同作用下的架空输电线路运行风险进行评估, 基于现代安全风险量化理论, 充分考虑各类自然灾害风险的发生可能性、对架空输电线路的影响程度以及危害的严重程度, 采用风险概率、线路故障输电能力损失值、风险社会影响系数三者综合量化架空线路灾害运行风险。基于此建立了多种自然灾害下架空输电线路运行风险评估体系, 并采用改进层次分析法计算不同自然灾害的风险权重, 保证评估结果的合理性。利用该方法完成了一例地区电网架空输电线路在多种自然灾害共同作用下的运行风险评估, 验证了方法的可行性。该评估方法通用性更强, 评估结果可为采取针对性灾害抵御措施、提高线路风险防范能力提供依据。

关键词: 架空输电线路; 自然灾害; 风险评估; 改进层次分析法

Risk assessment of overhead transmission lines under multiple natural disasters

SONG Naichao¹, WANG Ruiqi¹, LI Mingming¹, LIU Yongcong², SHEN Zheng², LU Hailiang²

(1. Zhumadian Power Supply Company, State Grid Henan Electric Power Company, Zhumadian 463000, China;

2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: We evaluate the operation risk of overhead transmission lines under the combined action of multiple natural disasters. The analysis is based on modern security risk quantification theory, fully considering the possibility of various natural disaster risks, the degree of impact on overhead transmission lines, the severity of the hazards, the risk probability, line failure transmission capacity loss value, and risk social impact coefficient. These are used to comprehensively quantify the disaster operation risk of overhead lines. It establishes a risk assessment system for the operation of overhead transmission lines under various natural disasters, and uses the improved analytic hierarchy process to calculate the risk weights of different natural disasters, to ensure the rationality of assessment results. This method is used to complete an operational risk assessment of a regional power grid overhead transmission line under multiple natural disasters. This verifies the feasibility of the method. The evaluation method proposed is versatile, and the results can provide a basis for taking targeted disaster prevention measures and improve the risk prevention capabilities of lines.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51507119) and the Science and Technology Project of State Grid Henan Electric Power Company (No. 5217H020000K).

Key words: overhead transmission line; natural disasters; risk assessment; improved analytic hierarchy process (IAHP)

0 引言

在全球气候变化的背景下, 极端天气气候事件频发^[1]。据中国电力可靠性管理中心的统计数据示, 自然灾害、气候因素是造成架空输电线路非计划停运的主要原因^[2]。据统计, 雷电是电网面临最

为频繁的自然灾害, 超强台风、极端低温冰雪、重大地震等灾害均对我国电网安全构成严重的威胁。

为了增强输电线路防范风险的能力, 提高架空线路运行的可靠性, 人们在架空输电线路运行风险评估方面开展了大量研究^[3-6]。1997年, 国际大电网研究协会首次正式提出电力系统运行风险评估的概念^[7]。近年来, 输电线路运行风险相关研究可分为两个方向, 一是对不同自然灾害、气象因素下的输电线路风险机理进行研究, 以更准确获得风险发

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51507119); 国网河南省电力公司科技项目资助(5217H020000K)

生的可能性^[8-12]；二是同时考虑各种相互关联的风险，合理量化线路实际面临的综合风险，指导相关管理、维护与决策工作^[13-18]。文献[19]提出了多气象因素组合的输电线路风险评判方法。之后，文献[20]将架空输电线路运行风险评估流程划分为识别、量化、判定三个阶段，但未给出风险量化的具体过程。文献[21-22]提出了架空线路综合运行风险评估方法，所给出的评估模型与风险值计算式具有启发性与应用价值，但对风险值中各项的具体计算过程相对简化，影响了评估结果的准确性和可信度。文献[23]给出的输电线路气象风险分析理论、线路故障概率预测方法实用性较强，但未对多气象灾害下的综合风险进行分析。

自然灾害引发的线路故障难以预料，并带来了复杂繁重的检修工作，因此有必要对架空线路运行风险进行评估，而大多数情况下，架空输电线路会同时面临多种自然灾害的威胁。为此，本文建立了多自然灾害下的架空输电线路运行风险评估体系及灾害风险权重层次结构模型，实现了考虑多种自然灾害共同作用下的架空输电线路运行风险评估，可用于输电线路的风险管控，保障电力系统安全运行。

1 架空输电线路灾害风险量化理论分析

1.1 架空输电线路灾害风险定义

现代安全风险定义是由洛伦斯提出的，即事件不利影响发生可能性与危害严重程度的综合度量，将这一定义拓展到架空输电线路自然灾害风险的表述中，即

$$R = f(p, h) = p \cdot h \quad (1)$$

式中： R 为自然灾害对架空线路影响的风险值； p 为自然灾害造成架空线路故障的概率； h 为线路故障造成危害的严重程度。

自然灾害造成架空线路故障的概率 p 可分为两部分并分别采用统计分析法计算，即

$$p = p_1 \cdot p_2 \quad (2)$$

式中： p_1 为自然灾害发生的概率； p_2 为灾害导致线路故障的概率。

风险危害的评估方法直接影响到评估结果的科学合理性，为了全面衡量风险危害的严重程度，基于式(3)计算线路故障造成危害的严重程度 h 。

$$h = Y \cdot S \quad (3)$$

式中： Y 为线路故障输送能力损失值； S 为风险的社会影响系数。

将式(3)扩展到多种自然灾害综合作用的情况，考虑到不同自然灾害类型发生时期不同，相应的风

险特征及危害也不同，引入自然灾害风险时期系数以及自然灾害的风险权重，某一自然灾害风险的社会影响系数为

$$S_i = \alpha_i \cdot w_i \quad (4)$$

式中： S_i 为自然灾害 i 导致线路风险的社会影响系数； α_i 为自然灾害 i 风险时期系数； w_i 为自然灾害 i 风险权重。

综上得到，架空输电线路灾害运行风险是风险故障概率、线路故障输送能力损失值、风险社会影响系数的综合函数，其计算式为

$$R = \sum_{i=1}^n p_i \cdot h_i = \sum_{i=1}^n p_i \cdot Y_i \cdot S_i \quad (5)$$

式中： R 为架空线路灾害运行风险值； p_i 为自然灾害 i 导致线路故障的概率； h_i 为自然灾害 i 下线路故障危害值； Y_i 为自然灾害 i 下线路故障输送能力损失值。

为了实现线路故障输送能力的量化，将 p_2 与 Y 的乘积定义为自然灾害发生时线路故障输送能力损失值 y 。

$$y = p_2 \cdot Y \quad (6)$$

则式(5)可等价变化为

$$R = \sum_{i=1}^n p_{1i} \cdot y_i \cdot \alpha_i \cdot w_i \quad (7)$$

式中： p_{1i} 为自然灾害 i 发生的概率； y_i 为自然灾害 i 发生时线路故障输送能力损失值； α_i 为第 i 种自然灾害的风险时期系数； w_i 为第 i 种自然灾害的风险权重。

根据 R 值的数值范围，并参照《电网运行安全风险管理规定》，将评估得到的同塔多回输电线路综合运行风险分为 6 个等级，对应的综合运行风险值 (R 值)如表 1 所示。

表 1 同塔多回输电线路综合运行风险等级

Table 1 Comprehensive operation risk level of multiple transmission lines in the same tower

风险等级	风险影响程度	分值
I 级风险	特大损失	$R \geq 1\ 000$
II 级风险	重大损失	$300 \leq R < 1\ 000$
III 级风险	较严重损失	$60 \leq R < 300$
IV 级风险	较大损失	$20 \leq R < 60$
V 级风险	一般损失	$5 \leq R < 20$
VI 级风险	较小损失	$R < 5$

1.2 架空输电线路灾害运行风险评估体系

根据架空输电线路风险定义，本文提出的多种自然灾害下架空输电线路运行风险评估体系，如图 1 所示。

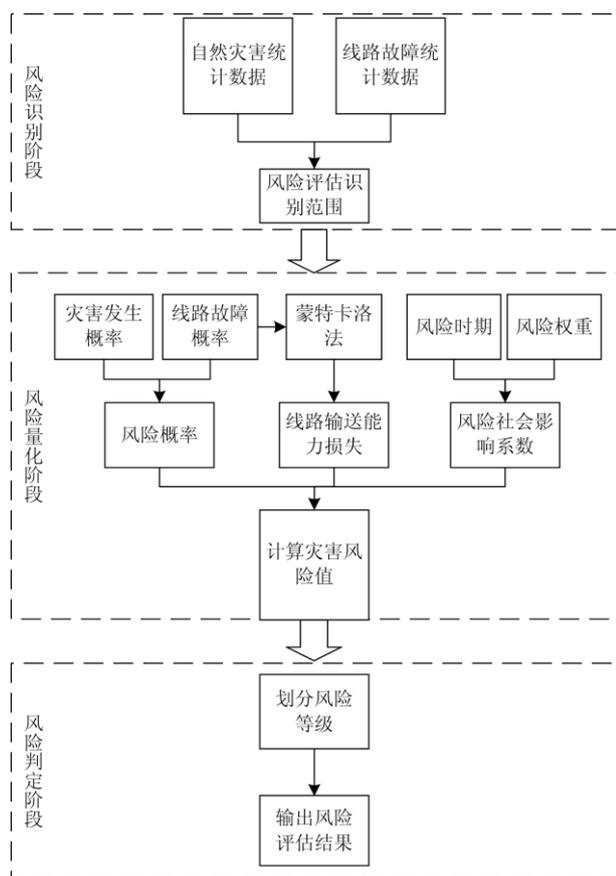


图 1 多种自然灾害下架空输电线路运行风险评估体系
Fig. 1 Risk assessment system of overhead transmission lines under multiple natural disasters

1.3 风险危害严重程度量化

根据 1.1 节式(3), 为了全面量化风险危害的严重程度, 需要基于不同自然灾害风险导致线路故障造成的负荷损失得到线路故障输送能力损失值 Y 或 y , 乘以相应风险的社会影响系数 S , 得到线路故障造成危害的严重程度 h 。

基于统计分析得到不同自然灾害下线路发生故障的概率, 采用蒙特卡洛法对线路在灾害发生时的运行状态进行模拟, 计算可能的线路强迫失效时间, 可得到风险导致的地区电网负荷损失。线路故障输送能力损失程度根据负荷损失比例来赋值, 具体见表 2。

考虑多种自然灾害综合作用的情况, 不同自然灾害类型发生时期不同, 相应的风险原因、故障修复难度、影响危害等特征也不同, 采用自然灾害风险权重与风险时期系数两个指标来描述某一自然灾害导致线路风险的社会影响系数, 如式(4)所示。

对于自然灾害的风险时期系数, 统计不同自然灾害发生时期, 基于贝叶斯估计得出各种自然灾害

风险发生时架空线路所处的保供电时期, 得到自然灾害风险时期系数, 见表 3。

表 2 架空输电线路故障输送能力损失等级

Table 2 Transmission capacity loss grade of overhead transmission line fault

等级	故障输送能力损失程度	分值
1	地区电网失稳或损失负荷 30%以上	3 000 以上
2	地区电网损失负荷 10%~30%	500~3 000
3	地区电网损失负荷 7%~10%	100~500
4	地区电网损失负荷 4%~7%	30~100
5	地区电网损失负荷 4%及以下	0~30

表 3 架空输电线路自然灾害风险时期系数

Table 3 Overhead transmission line natural disaster risk period coefficient

等级	故障发生所处时期	取值
1	特级保供电	2.0
2	一级保供电	1.6
3	二级保供电	1.4
4	特殊时期保供电	1.2
5	一般时期保供电	1.0

自然灾害的风险权重是一个综合比例系数, 反映各灾害风险的影响程度, 其中包含了评估技术人员的主观能动对评估过程的作用, 而非仅基于统计数据得出的客观指标, 对评估结果有重要影响。为了使评价结果更加合理、客观, 降低个人的主观局限性对评估结果的影响, 文章采用改进层次分析法 (IAHP) 来确定不同自然灾害对架空线路运行风险的影响权重。

2 基于改进层次分析法的风险权重计算

层次分析法通过分析复杂问题所包含的因素及相关关系, 将问题分解为若干元素, 并按这些元素的内在关系分组分层, 通过定性指标和模糊量化方法构造判断矩阵并计算主特征向量^[24-25]。层次分析法在应用中存在主观性强、非一致性、计算繁琐等问题, 因此人们提出了一种改进层次分析法^[26]。改进层次分析法建立的判断矩阵更为准确, 无需进行一致性检验, 且分析结果更为合理。

2.1 灾害风险权重层次结构模型

首先把目标决策问题层次化, 按照属性的不同将相关的各个因素分解成若干层次, 形成多层次的指标结构模型。基本的层次模型结构可划分为目标层-准则层-因素层三层结构。

根据架空输电线路运行风险的特点和影响因素, 将各自然灾害风险权重因素划分为如图 2 所示层次结构。

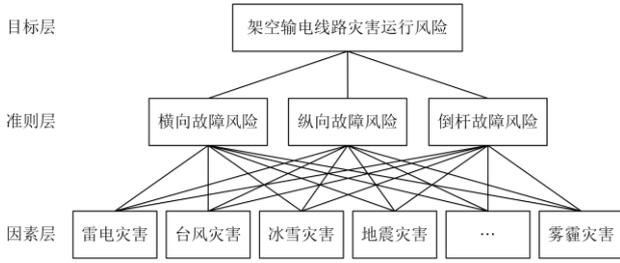


图2 架空输电线路自然灾害风险权重层次结构

Fig. 2 Hierarchical structure of natural disaster risk weights for overhead transmission lines

1) 目标层只有一个元素，即分析问题的目标或结果。本部分架空线路运行风险评估的目标即为根据各自然灾害风险特征及危害，确定评估模型中各种自然灾害的风险权重。

2) 准则层为目标问题所包含的准则、子准则。架空线路运行时面临的故障类型主要包括横向故障、纵向故障、倒杆故障等。在对本层元素进行重要性排序时，主要考虑架空线路不同类型故障的严重程度、修复难度及对电力系统和用户的影响大小。

3) 因素层包含影响目标问题的具体因素。根据风险识别阶段所确定的风险评估识别范围确定本模型中考虑的若干自然灾害类型。在对本层元素进行重要性排序时，主要考虑评估架空线路所在地区，不同自然灾害种类导致不同故障类型的可能性。

基于统计资料和专家经验，综合考虑风险原因、故障修复难度、影响危害、所在地区、电网规模等方面，对所评估的实际架空线路，分别按照每层元素对上层某元素影响的重要程度进行排序。

2.2 权重向量的计算

根据上述层次结构模型，分别计算准则层各元素对目标层的权重向量 \mathbf{W}_1 ，以及因素层各元素对准则层(横向故障、纵向故障、倒杆故障)各元素的权重向量 \mathbf{W}_{21} 、 \mathbf{W}_{22} 、 \mathbf{W}_{23} 。

以 \mathbf{W}_{21} 为例，说明单个权重向量的具体计算步骤。

1) 列出比较矩阵

设有 n 种自然灾害类型，根据各种自然灾害的重要程度排序，采用三标度法得出相应的比较矩阵 \mathbf{A}_{21} ，如式(8)所示。

$$\mathbf{A}_{21} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中， a_{ij} 为自然灾害 i 与自然灾害 j 影响重要程度

的比较结果，其取值分别为 2 (i 比 j 重要程度高)、 1 (i 与 j 重要程度相同)和 0 (i 比 j 重要程度低)，且 $a_{ii} = 1$ 。

2) 计算排序指数

计算比较矩阵 \mathbf{A}_{21} 中各种自然灾害的重要性排序指数 r_i ，如式(9)所示。

$$r_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (9)$$

3) 构造判断矩阵

根据排序指数 r_i 构造自然灾害种类对风险大小的判断矩阵 \mathbf{B}_{21} ，其元素 b_{ij} 为

$$b_{ij} = \begin{cases} \frac{r_i - r_j}{l_m} (k_m - 1) + 1, & r_i \geq r_j \\ \left(\frac{r_j - r_i}{l_m} (k_m - 1) + 1 \right)^{-1}, & r_i < r_j \end{cases} \quad (i, j=1,2,\dots,n) \quad (10)$$

式中： $l_m = r_{\max} - r_{\min}$ ， $r_{\max} = \max(r_i)$ ； $r_{\min} = \min(r_i)$ ； $k_m = r_{\max} / r_{\min}$ 。

4) 计算最优传递矩阵

计算判断矩阵 \mathbf{B}_{21} 的最优传递矩阵 \mathbf{D}_{21} ，其元素 d_{ij} 为

$$d_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (\lg b_{ik} - \lg b_{jk}) \quad (i, j=1,2,\dots,n) \quad (11)$$

5) 计算拟优一致矩阵

计算判断矩阵 \mathbf{B}_{21} 的拟优一致矩阵 \mathbf{P}_{21} ，其元素 p_{ij} 为

$$p_{ij} = 10^{d_{ij}} \quad (i, j=1,2,\dots,n) \quad (12)$$

6) 计算主特征向量

采用和积法计算拟优一致矩阵 \mathbf{P}_{21} 的主特征向量 \mathbf{W}_{21} (即权重向量)，具体计算过程如下。

(1) 将矩阵 \mathbf{P}_{21} 各行元素分别相加除以自然灾害种类数 n ，得到向量 $\bar{\mathbf{w}}_i$ ，如式(13)所示。

$$\bar{\mathbf{w}}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n p_{ij} \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (13)$$

(2) 将向量 $\bar{\mathbf{w}}_i$ 归一化，求得权重向量 \mathbf{W}_{21} 。

$$w_i = \frac{\bar{\mathbf{w}}_i}{\sum_{i=1}^n \bar{\mathbf{w}}_i} \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (14)$$

$$\mathbf{W}_{21} = [w_1, w_2, \dots, w_n]^T \quad (15)$$

7) 按照步骤 1)~步骤 6)求得各层权重向量后，根据式(16)将各层权重合成得到因素层各自然灾害种类对目标层架空线路运行风险的综合权重 \mathbf{W} ，如

式(16)所示。

$$W = [W_{21} \quad W_{22} \quad W_{23}] W_1 = [w_1 \quad w_2 \quad w_3 \quad w_4 \quad w_5 \quad w_6]^T \quad (16)$$

3 算例分析

参考某地区过往自然灾害及线路故障统计数据,完成一例实际架空输电线路风险故障概率评估,展示本文评估方法的具体实现过程。

3.1 风险识别

统计该地区电网连续 5 年架空线路跳闸情况如表 4 所示。

表 4 某地区架空输电线路 5 年跳闸情况

Table 4 Trips of overhead transmission lines in 5 years

年份	冰雪	洪涝	雷电	大风	地震
第 1 年	2	10	47	1	3
第 2 年	1	30	73	1	2
第 3 年	9	15	31	2	3
第 4 年	6	10	45	1	2
第 5 年	7	11	48	4	2
总计	25	76	244	9	12

因此该地区架空输电线路运行面临的自然灾害风险主要包括雷电、冰雪、地震、洪涝及大风灾害等。

3.2 风险量化

为方便本算例分析,根据简化公式计算不同自然灾害造成架空输电线路故障的概率 p_i ,结果如表 5 所示。应用蒙特卡洛法对各种自然灾害作用下架空输电线路状态进行模拟,计算得到不同自然灾害导致架空线路故障的负荷损失,根据架空输电线路故障输送能力损失等级表 2,采用线性插值法对其打分,得到线路故障输送能力损失值,结果见表 6 所示。

基于改进层次分析法,计算各层权重向量,根据式(16)计算得到不同自然灾害对架空线路运行的风险权重。

表 5 各种自然灾害作用下架空输电线路故障严重程度

Table 5 Severity of overhead transmission line failures under various natural disasters

自然灾害类型	负荷损失比例/%	分值
冰雪	12	750
洪涝	14	1 000
雷电	9.25	400
大风	6.14	80
地震	11.2	650

表 6 各种自然灾害作用下架空输电线路运行风险值

Table 6 Risk value of overhead transmission lines under various natural disasters

自然灾害类型	风险概率 p_i /%	线路故障输送能力损失值 y	风险社会影响系数 S	运行风险值 R
冰雪	8.3	750	0.248 8	15.5
洪涝	3.3	1 000	0.203 9	6.73
雷电	52.0	400	0.284 3	59.1
大风	6.0	80	0.214 2	1.03
地震	2.3	650	0.416 6	6.23

$$W = [W_{21} \quad W_{22} \quad W_{23}] W_1 = \begin{bmatrix} 0.0911 & 0.5161 & 0.0770 \\ 0.0911 & 0.2689 & 0.1618 \\ 0.5161 & 0.0911 & 0.0770 \\ 0.2689 & 0.0327 & 0.2649 \\ 0.0327 & 0.0911 & 0.1492 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0.2222 \\ 0.2222 \\ 0.5556 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.1777 & 0.1699 & 0.1777 & 0.2142 & 0.2604 \end{bmatrix}^T$$

为方便本算例分析,假定各自然灾害发生时架空线路所处的保供电时期,由表 3 得到相应自然灾害风险时期系数,根据式(4)计算得到架空输电线路不同自然灾害风险的社会影响系数。根据图 1 多种自然灾害下架空输电线路风险评估体系及风险量化理论,计算各种自然灾害作用下架空输电线路的运行风险值,结果见表 6。

根据式(7),计算得到架空输电线路灾害运行风险值为

$$R = \sum_{i=1}^n p_{i1} \cdot y_i \cdot \alpha_i \cdot w_i = 88.6$$

3.3 风险判定

根据表 1,灾害风险值 $R=88.6$ 对应架空输电线路灾害运行风险等级为 III 级风险。因此,根据评估结果,需要对所评估的架空线路采取一定的运行风险防范措施,加强线路对自然灾害的抵御能力。

根据表 6,可以得到所评估架空输电线路面临的自然灾害类型,冰雪、洪涝、雷电、大风、地震对灾害运行风险值的贡献分别为 17.5%、7.6%、66.7%、1.2%、7.0%。其中,由于雷电灾害的故障概率与风险社会影响系数较大,因此其对运行风险贡献最大;其次为冰雪灾害,因为其线路故障输送能力损失较严重,且风险社会影响系数较大;另外,虽然洪涝和地震灾害的风险概率很低,但洪涝灾害的线路故障输送能力损失最大,而地震灾害的风险社会影响系数最大,所以二者也对运行风险有一定的作用;而大风灾害线路故障输送能力损失最小,

且其风险概率与社会影响系数均较小，因此所对应的灾害风险值也较低。

4 结论

本文提出了一种考虑多种自然灾害共同作用下的架空输电线路风险评估方法，其主要特点有：

1) 建立了一套考虑风险发生可能性、风险对线路影响程度、风险危害严重程度的灾害风险量化理论，可较全面地量化架空线路灾害运行风险；

2) 基于线路故障概率，采用蒙特卡洛法计算不同灾害导致的线路负荷损失，可准确量化不同自然灾害下的线路输送能力损失；

3) 风险社会影响系数包括基于客观数据的风险时期系数与基于主观能动的风险权重两项，可综合评估不同自然灾害下线路运行风险危害的严重程度；

4) 采用改进层次分析法计算风险权重，并建立了架空线路灾害风险权重层次结构模型，使评估结果更加准确合理。

参考文献

[1] 丁一汇, 张锦, 宋亚芳. 天气和气候极端事件的变化及其与全球变暖的联系——纪念 2002 年世界气象日“减低对天气和气候极端事件的脆弱性”[J]. 气象, 2002, 28(3): 3-7.
DING Yihui, ZHANG Jin, SONG Yafang. Changes in weather and climate extreme events and their association with the global warming[J]. Meteorological Monthly, 2002, 28(3): 3-7.

[2] 陈丽娟, 李霞. 2011 年全国输变电设施可靠性分析[J]. 中国电力, 2012, 45(7): 89-93.
CHEN Lijuan, LI Xia. Statistic analysis on reliability of power transmission and transformation facilities in China in 2011[J]. Electric Power, 2012, 45(7): 89-93.

[3] 曾勇斌, 王星华, 彭显刚, 等. 输电线路缺陷风险建模及其预测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 91-98.
ZENG Yongbin, WANG Xinghua, PENG Xiangang, et al. Research on risk modeling and forecasting method of transmission line defects[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 91-98.

[4] 黄欢, 雷加智, 曾华荣, 等. 极端外部环境下输电线路的综合风险评估方法[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(2): 119-127.
HUANG Huan, LEI Jiazhi, ZENG Huarong, et al. Integrated risk assessment system of transmission line under extreme external environment[J]. Journal of Electric

Power Science and Technology, 2019, 34(2): 119-127.

[5] 黄绪勇, 沈志, 王昕. 云南电网输电线路鸟害故障风险评估方法[J]. 高压电器, 2020, 56(3): 156-163.
HUANG Xuyong, SHEN Zhi, WANG Xin. Risk assessment method of bird damages for Yunnan power grid transmission line[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(3): 156-163.

[6] ENTRIKEN R, LORDAN R. Impacts of extreme events on transmission and distribution systems[C] // IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 22-26, 2012, San Diego, CA, USA: 1-10.

[7] SERMANSON V, MARUEJOULS N, LEE S, et al. Probabilistic reliability assessment of the North American eastern interconnection transmission grid[C] // Proceeding of CIGRE Conference, 2002, Paris, France: 179-184.

[8] 庄文兵, 祁创, 熊小伏, 等. 计及气象因素时间累积效应的输电线路覆冰预测[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(17): 6-13.
ZHUANG Wenbing, QI Chuang, XIONG Xiaofu, et al. Transmission line icing forecast considering the time cumulative effect of meteorological factors[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(17): 6-13.

[9] 熊小伏, 曾勇, 王建, 等. 基于山火时空特征的林区输电通道风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 1-9.
XIONG Xiaofu, ZENG Yong, WANG Jian, et al. Risk assessment of power transmission channels in forest regions based on spatial-temporal features of forest fire[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 1-9.

[10] 陈嘉宁, 吴振杰, 王源涛, 等. 基于雷击灾害的输电网可靠性综合评估模型[J]. 高压电器, 2020, 56(2): 170-175, 182.
CHEN Jianing, WU Zhenjie, WANG Yuantao, et al. Lightning disaster-based comprehensive reliability assessment model for transmission grid[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(2): 170-175, 182.

[11] EL-ZOHRI E H, ABDEL-SALAM M, SHAFEY H M, et al. Mathematical modeling of flashover mechanism due to deposition of fire-produced soot particles on suspension insulators of a HVTL[J]. Electric Power Systems Research, 2013, 95: 232-246.

[12] FORSTER C, RITTER A, GEMSA S, et al. Satellite based real-time thunderstorm nowcasting for strategic flight planning enroute[J]. Air Traffic Control Quarterly, 2016, 24(4): 113-124.

[13] 常康, 徐泰山, 郁琛, 等. 自然灾害下电网运行风险控制策略探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 73-81.

- CHANG Kang, XU Taishan, YU Chen, et al. Discussion of power system operation risk control strategy in natural disasters[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 73-81.
- [14] WEN Fan, YUAN Liao. Wide area measurements based fault detection and location method for transmission lines[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(1): 53-64. DOI: 10.1186/s41601-019-0121-9.
- [15] 李更丰, 邱爱慈, 黄格超, 等. 电力系统应对极端事件的新挑战与未来研究展望[J]. 智慧电力, 2019, 47(8): 1-11.
LI Gengfeng, QIU Aici, HUANG Gechao, et al. New challenges and future research prospects in power system against to extreme events[J]. Smart Power, 2019, 47(8): 1-11.
- [16] WANG Y, CHEN C, WANG J, et al. Research on resilience of power systems under natural disasters—a review[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 1604-1613.
- [17] WANG Jian, XIONG Xiaofu, ZHOU Ning, et al. Early warning method for transmission line galloping based on SVM and AdaBoost bilevel classifiers[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(14): 3499-3507.
- [18] MADANI R, LAVAEI J, BALDICK R. Constraint screening for security analysis of power networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(3): 1828-1838.
- [19] 熊小伏, 王尉军, 于洋, 等. 多气象因素组合的输电线路风险分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(6): 11-15, 28.
XIONG Xiaofu, WANG Weijun, YU Yang, et al. Risk analysis method for transmission line combining of various meteorological factors[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2011, 23(6): 11-15, 28.
- [20] 王奇, 钱海, 常安, 等. 基于数字电网统一功能架构的高压输电架空线路专家系统的设计与实现[J]. 华东电力, 2014, 42(4): 698-703.
WANG Qi, QIAN Hai, CHANG An, et al. Design and implementation of HV overhead transmission line expert system based on unified functional architecture of digital power grid[J]. East China Electric Power, 2014, 42(4): 698-703.
- [21] 李述文. 恶劣气象灾害下架空输电线路运行风险评估研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
LI Shuwen. Research on the evaluation of overhead transmission line operation risk under the bad meteorological disasters[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.
- [22] 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.
DENG Honglei, DAI Dong, LI Shuwen. Comprehensive operation risk evaluation of overhead transmission line based on hierarchical analysis-entropy weight method[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 28-34.
- [23] 王建. 输电线路气象灾害风险分析与预警方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
WANG Jian. Research on meteorological disaster risk analysis and fault early warning methods for overhead transmission lines[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [24] 邓雪, 李家铭, 曾浩健, 等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(7): 93-100.
DENG Xue, LI Jiaming, ZENG Haojian, et al. Research on computation methods of AHP weight vector and its applications[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2012, 42(7): 93-100.
- [25] 朱蕾, 蒋浩. 基于改进主成分分析的低压配电网供电所综合评价方法[J]. 电力工程技术, 2018, 37(4): 38-44.
ZHU Lei, JIANG Hao. Comprehensive evaluation method based on improved principal component analysis of low voltage distribution network power substations[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(4): 38-44.
- [26] 赵淳, 阮江军, 李晓岚, 等. 输电线路综合防雷措施技术经济性评估[J]. 高电压技术, 2011, 37(2): 290-297.
ZHAO Chun, RUAN Jiangjun, LI Xiaolan, et al. Technology and economy evaluation of comprehensive transmission line lightning protection measures[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(2): 290-297.

收稿日期: 2021-01-01; 修回日期: 2021-03-15

作者简介:

宋耐超(1981—), 男, 硕士, 研究方向为电力系统自动化; E-mail: songnaichao@126.com

王瑞琦(1976—), 男, 本科, 研究方向为电力系统自动化; E-mail: wangruizmd@163.com

李明明(1973—), 女, 硕士, 研究方向为电力系统自动化。E-mail: 2833689311@qq.com

(编辑 周金梅)