

计及气象因素的输电线路安全性评估

王津宇¹, 李哲¹, 梁允¹, 孟高军²

(1. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450052; 2. 南京工程学院电力工程学院, 江苏 南京 211167)

摘要: 输电线路的安全运行是保障电能稳定传输的重要基础, 而输电线路的运行状态受气象因素影响较大。为评估输电线路系统面临的综合风险, 提出计及气象因素的输电线路安全性评估模型。首先根据输电线路架构的特点构建了反映输电线路运行状态的评估指标体系, 同时基于图论原理提出一种新的图模型赋权方法, 以克服传统物元可拓模型赋权中存在的人为主观因素缺点; 其次以物元可拓理论构造了输电线路的综合风险物元及安全性评级, 建立计及气象因素的输电线路风险安全性评估及动态管理模型; 最后以某地区为例研究其输电线路的运行风险情况, 分析结果验证该输电线路安全性评估模型的科学性和实用性。

关键词: 气象因素; 输电线路; 安全性; 图论; 模型评估

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.01.024 中图分类号: TM77 文章编号: 1673-9140(2023)01-0210-08

Safety evaluation of transmission lines considering meteorological factors

WANG Jinyu¹, LI Zhe¹, LIANG Yun¹, MENG Gaojun²

(1. Electric Power Research Institute of Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China;
2. School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: The safe operation of transmission lines is an important basis for ensuring stable transmission of electric energy, and the safety is greatly affected by meteorological factors. In order to evaluate and improve the risk early warning capability in the transmission system, this paper proposes a transmission line safety evaluation model that takes into account meteorological factors. Firstly, according to the characteristics of the transmission line architecture, an evaluation index system reflecting the operation status of the transmission line is constructed. At the same time, a new graph model weighting method is proposed based on the principle of graph theory to overcome the human subjectivity factor disadvantages in the weighting of the traditional matter-element extension model. Secondly, based on the matter-element extension theory, the comprehensive risk matter-element and safety rating of transmission lines are constructed, and the risk safety assessment and dynamic management model of transmission lines considering meteorological factors are established. Finally, taking a certain region as an example to study the operation risk of its transmission lines, the analysis results verify the scientificity and practicability of the transmission line safety assessment model.

Key words: meteorological factors; transmission line; safety; graph theory; model evaluation

随着社会经济的快速发展, 各地用电量屡破新高。但由于中国能源分布不均, 为缓解地区用电不平衡问题, 中国在输电网建设和大电网互联等方面加大了发展力度。输电线路通常电压等级较高, 而

收稿日期: 2021-08-06; 修回日期: 2022-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(51877101); 江苏省高等学校自然科学基金项目(20KJB480006)

通信作者: 王津宇(1994—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事电网防灾减灾、电力气象预警研究; E-mail: wjy202301@163.com

采用超高压及特高压技术的输电通道则更具有传输距离远、电能损耗小、电能传输规模大等优点^[1]。因此,以超高压和特高压的远距离输电通道的建设方面尤为突出。但随着输电网络的扩大以及线路数量的增多,输电系统面临的运行风险也逐渐增加。其中,气象因素是影响输电线路安全的最典型因素,例如雷电大风,冰霜雨雪以及不同地区空气的温度、湿度、盐碱度等^[2],此外,各地气候的多样性对于输电线路在绝缘、拉伸等方面的性能有了更高的要求。与此同时,因气象因素引起的电网停电事故也时有发生^[3]。例如,2008年中国南方大雪停电事故、2012年印度恶劣天气引起的停电事故以及2021年2月美国的德州大雪、6月加州高温导致的停电事故等。根据历年来的停电事故分析,由于气象因素导致的输电线路停电事件不仅频率高,而且范围更广,危害更大。因此,有必要考虑研究气象因素对输电线路的安全性影响,挖掘分析影响线路安全运行的潜在风险因素,这对于电网企业抵御供电风险具有重要意义。

目前,也有不少学者就气象因素影响下的输电线路安全及风险评估等方面开展了不少研究。文献[4-5]研究不同气象因素下的输电线路发生故障概率情况;文献[6]分析恶劣天气条件对输电线路构件的影响,提出输电线路故障概率的实时计算模型。在此基础上,文献[7]研究覆冰情形下的输电线路故障及其事故概率预测方法。尽管以上这些学者将不同类型的气象因素纳入了对输电线路安全运行的研究,但仅仅依据故障概率模型无法完全反映出输电线路系统的整体安全状态,且并未建立科学的输电线路安全性评估模型。为解决该类问题,也有学者将气象因素的影响纳入考虑,通过建立相关的安全风险评价指标,并采用模糊评价法、层次分析等传统评价方法^[8-9]或结合神经网络等各类智能算法^[10]开展输电线路运行风险的研究。采用这些评价模型虽然可以实现对输电线路安全性水平的综合评估,但其缺点是难以体现出输电线路面临的安全风险水平,此外也难以分析影响输电线路运行风险的潜在因素,通常根据主观意识去判断容易存在一定的局限性。

针对当前关于气象因素影响下的输电线路安全性分析方法及相关研究模型存在的不足,本文通过考虑气象因素对输电线路系统中绝缘子、导线、避雷器等基本结构的安全性影响,基于物元可拓理论建立关于输电线路的安全性评估和动态管理模型,实现对输电线路安全风险水平的评估。采用该方法不仅可以评估单个风险指标的安全情况,同时还可以从宏观角度对输电线路系统的安全性进行评估分析,对高风险指标进行辨识,可为输电线路的安全性评估和风险控制等方面提供科学指导。

1 计及气象因素的输电线路安全性评估指标

考虑到气象因素的影响,输电线路的安全运行状态主要分为可控和不可控2种形式:例如输电线路系统中的导线或避雷器等受到腐蚀而出现的泄漏电流等现象属于不可控现象,对于线路覆冰或线路潮流越限等可以通过一定技术手段改善的均属于人为可控。因此,各类气象因素增加了输电线路运行状态的复杂性和多样性。为准确反映输电线路的安全性水平,需考虑输电线路面临的不同层次的风险因素,并将其体现为具体的安全评价指标,通过建立层级有序的评价指标体系才能更有效地对输电线路的安全性运行水平开展评估。

1.1 评估指标体系

输电系统主要由导线、塔杆、避雷器和绝缘子等部分组成,而各类气象条件主要通过腐蚀、外力拉伸等作用于输电线路系统,为了能够真实反映出气象对输电系统的影响,需考虑输电系统各主要组成部分(导线、塔杆等)因气象条件导致的故障,分析输电线路系统因气象条件导致的外部 and 内部安全风险^[11]。为评估线路的安全运行状态,本文根据气象因素对输电线路的影响,并考虑输电线路系统因气象危险出现的各类可控及不可控现象,建立计及气象因素的输电线路安全状态评估指标体系,如图1所示。

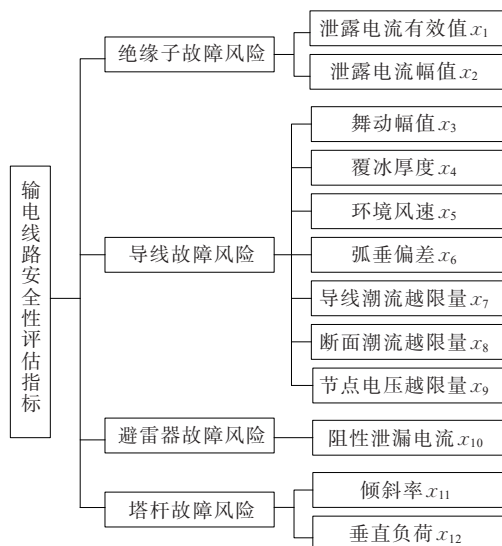


图1 输电线路安全性评估指标体系

Figure 1 Safety evaluation index system of transmission line

图1从输电线路因气象条件可能出现的绝缘子故障、导线故障、避雷器故障及塔杆故障4个方面建立多层次评估指标。各指标数值计算根据选取相应的典型日,其中计算各评价指标的相关数值可由SCAD系统及实地测量采集得到。限于本文篇幅,图1中指标的计算可参阅文献[12],其中典型指标的计算如下。

1) 导线潮流越限量。

$$O_L = \frac{L_a}{L_{a, \max}} - 1 \quad (1)$$

式中, L_a 为某一导线 a 的潮流; $L_{a, \max}$ 为该导线 a 最大潮流上限。

2) 断面潮流越限量。

$$O_F = \frac{\sum_{a \in F} L_a}{L_{F, \max}} - 1 \quad (2)$$

式中, $L_{F, \max}$ 为流过断面 F 的最大功率上限。

3) 节点电压越限量 O_V 。

$$O_V = \max\left(\frac{V_b}{V_{b, \max}} - 1, 1 - \frac{V_b}{V_{b, \min}}\right) \quad (3)$$

式中, V_b 为节点 b 的电压; $V_{b, \max}$ 、 $V_{b, \min}$ 分别为该节点的电压上下限。

1.2 指标量化及处理

根据对泄漏电流、线路形变幅值等指标的监测量的分析可以发现,图1中各项安全性评估指标数值越小,则表示输电线路运行在越高的安全状态。

因此,为方便后续开展分析并考虑输电线路各项性能裕度,本文采用降半梯形模型对不同量纲的指标进行量化处理。

设定各指标无量纲化后的区间范围为 $[0, 1]$,0表示输电线路该指标数值接近或超出规定的范围,1表示该安全性指标数值在可接受的正常范围内,量化模型如图2所示。

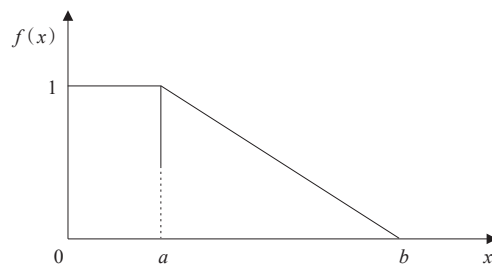


图2 安全性评价指标量化模型

Figure 1 Quantitative model of safety evaluation index

采用如下公式对各指标进行量化:

$$f(x) = \begin{cases} 1, & 0 \leq x \leq a \\ 1 - \frac{x-a}{b-a}, & a < x \leq b \\ 0, & x > b \end{cases} \quad (4)$$

式中, x 为指标经监测装置读取的实际数值; a 、 b 为指标的阈值; $f(x)$ 为指标量化处理后的数值。

2 基于图论的指标权重计算

2.1 评价信息的量化

基于图论计算权重的核心是建立指标评价者的图模型,其思路是将各指标重要性程度视为图的点,描述指标属性;图的边反映评价者将各指标联系起来的评价行为之间的关联关系,即评价者认可不同指标的不同属性之间关系,表现为将评价者认可属性将点与点连接起来构成边^[13-14]。由此,建立的点(指标属性)一边(属性认可行为关联关系)得到反映评价信息的图模型,假设被评价对象的指标有3个,每个指标有2种属性,其图模型可表示如图3所示。

假设评价某事物 Y ,设有 N 个评价指标和 M 个评价者,每个评价者以 Y 为目标,对这些指标进行评价(评价采用 α 分制, α 为整数),评价信息的情况如表1所示。

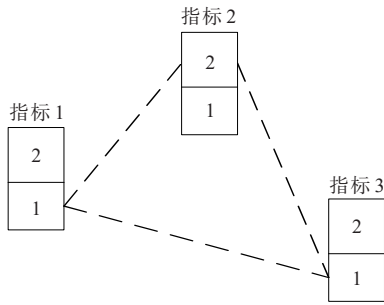


图 3 评价者的评价图示

Figure 3 Evaluation graph of evaluator

表 1 评价信息样

Table 1 Evaluation Information Sample Form

指标	评价者 1	评价者 2	...	评价者 M
1	V_{11}	V_{12}	...	V_{1M}
2	V_{21}	V_{22}	...	V_{2M}
⋮	⋮	⋮
N	V_{N1}	V_{N2}	...	V_{NM}

定义每名评价者的评分向量 $v_{a^N \times 1}^m$ 。其中,第 m 名评价者对第 k 个指标作 z 的评分时,存在 2 种情况,即

$$\begin{cases} v_{i \times 1}^m = 0, & l \in \{ak - \alpha + 1, ak - \alpha + 2, \dots, ak\} \\ v_{i \times 1}^m = 1, & l \in ak - z + 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中, k 为第 k 个指标; z 为对第 k 个指标的评分; α 为评分制。

每个评价者对全体指标的评价信息用一维向量 $v_{a^N \times 1}^m$ 表示,但该一维向量是割裂的,各指标评价信息相互独立,人为的评价习惯和评价行为会对指标的评价结果存在一定联系和影响。而图 3 中虚线描述了评价者通过评价行为将指标联系起来的关系,而这个关系对于反应评价者的评价习惯和得到完整的指标评价信息是非常重要的。定义向量的乘法运算可得到与图 3 等价的二维矩阵,反映第 m 名评价者全体指标评价信息的矩阵为

$$A_{a^N \times a^N}^m = v_{a^N \times 1}^m (v_{a^N \times 1}^m)^T \quad (6)$$

将每名评价者的评分矩阵加总,得到整个系统的评分矩阵如下:

$$A_{a^N \times a^N} = \sum_{m=1}^M A_{a^N \times a^N}^m = \sum_{m=1}^M v_{a^N \times 1}^m (v_{a^N \times 1}^m)^T \quad (7)$$

2.2 权重计算

为得到全部指标最终的评价得分向量,将式(7)得到的反映全体评价信息的矩阵 $A_{a^N \times a^N}$ (简记为 A) 进行降维处理,将其降到一维,且尽可能保持矩阵 A

的信息少损失,即

$$\begin{cases} \max \frac{W^T A W}{W^T W} \\ \text{s.t.} \sum_{i=1}^{a^N} \omega_i = 1 \end{cases} \quad (8)$$

式(8)优化的目标函数等于矩阵 A 在一维向量 W 上的投影,其中 ω_i 是向量 W 的第 i 个元素。根据 Perron-Frobinus 定理,式(8)有唯一非负解。将求得的 W 按照指标进行分割,并针对每一分割的单元逐一进行归一化运算,将运算的结果与相应的分数求积再求和得到反映各指标重要性的评价数值 V_1, V_2, \dots, V_N , 得到指标权重为

$$\lambda_{s,i} = V_i / \sum_{k=1}^N V_k \quad (9)$$

3 基于物元可拓模型的输电线路安全性评估及动态管理

3.1 输电线路安全性评估模型

本文以物元可拓理论为基础,建立输电线路的安全性评估模型。物元可拓模型是以物元理论和可拓集合论作为理论框架,以指标体系为基础,通过建立指标的经典域、节域和对象的评价等级,再依据指标权重及其实际数值计算分析得出待评物元与评价等级的关联程度,即可以由此来确定输电线路的相应风险等级^[15-17]。利用这种方法开展风险评估不是简单地利用指标数据迭代得到风险数值,而是考虑到了各指标与所划分风险等级的内在关联性。由于指标划分的等级是根据相关标准和实际情况得到的,能够有效避免传统评价方法评价风险等级时存在的主观片面性。本文提出的基于物元可拓理论的输电线路安全性评估模型构造如下。

1) 物元构造。

输电线路安全性评估的物元主要由经典域、节域和待评物、元,定义待评价目标的名称(N)、特征(C)和量值(V)三要素组成,采用 $R=(N, C, V)$ 表示数电线路的安全运行状态。假定将输电线路的安全性风险分为 y 个等级,采用 n 个指标开展安全性评估。安全性评估模型中的物元构造如下。

① 构建安全性评估经典域。

$$R_N = \begin{bmatrix} P_j & C_1 & (a_{j1}, b_{j1}) \\ & C_2 & (a_{j2}, b_{j2}) \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & (a_{jn}, b_{jn}) \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中, P_j 为输电线路的安全性水平在第 j 等级($j=1, 2, \dots, y$); C_i 为等级 P_j 的第 i 个指标($i=1, 2, \dots, n$); (a_{ji}, b_{ji}) 为当安全风险为第 j 等级时指标 C_i 的范围, 该范围参考相关标准及专家设定。

② 构建安全性评估节域。

$$R_p = \begin{bmatrix} P & C_1 & (a_{p1}, b_{p1}) \\ & C_2 & (a_{p2}, b_{p2}) \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & (a_{pn}, b_{pn}) \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中, P 为设定的全体安全性水平的等级; (a_{pi}, b_{pi}) 为指标 C_i 的整体取值范围, 即节域表示评价指标整体取值范围。

③ 构建安全性评估待评物元。

$$R_0 = \begin{bmatrix} P_0 & C_1 & v_1 \\ & C_2 & v_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & v_n \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中, P_0 为待评物元; v_1, v_2, \dots, v_n 为各指标的无量纲化数值。

2) 关联系数计算。

根据计算得到的经典域、节域和待评物元, 指标 i 与输电线路安全风险等级的关联度程度计算如下:

$$r_j(v_i) = \begin{cases} \frac{-\rho(v_i, V_{ij})}{|V_{ij}|}, & v_i \in V_{ij} \\ \frac{\rho(v_i, V_{pi})}{\rho(v_i, V_{pi}) - \rho(v_i, V_{ij})}, & v_i \notin V_{ij} \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} V_{ij} = |b_{ji} - a_{ji}| \\ \rho(v_i, V_{ij}) = \left| v_i - \frac{1}{2}(a_{ji} + b_{ji}) \right| - \frac{1}{2}(b_{ji} - a_{ji}) \\ \rho(v_i, V_{pi}) = \left| v_i - \frac{1}{2}(a_{pi} + b_{pi}) \right| - \frac{1}{2}(b_{pi} - a_{pi}) \end{cases} \quad (14)$$

式(13)、(14)中, $r_j(v_i)$ 为指标 i 相对于安全等级 j 的关联度; v_i 为指标 i 的无量纲数值; V_{ij} 为指标 i 在等级 j 下的经典域范围; V_{pi} 为指标 i 节域范围。

3) 安全性水平等级计算。

$$K_j(P_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i r_i(v_i), i=1, 2, \dots, n \quad (15)$$

式中, $K_j(P_0)$ 为输电线路与安全性等级 j 的关联度; λ_i 为指标 i 的权重。当 $K_j(P_0)$ 最大值时, 则其对应的安全性水平等级为 j 。

3.2 输电线路安全运行动态管理研究

根据建立的输电线路安全性评估模型, 构建保障输电线路安全运行的动态管理行为模式, 其动态风险评估流程如图4所示。

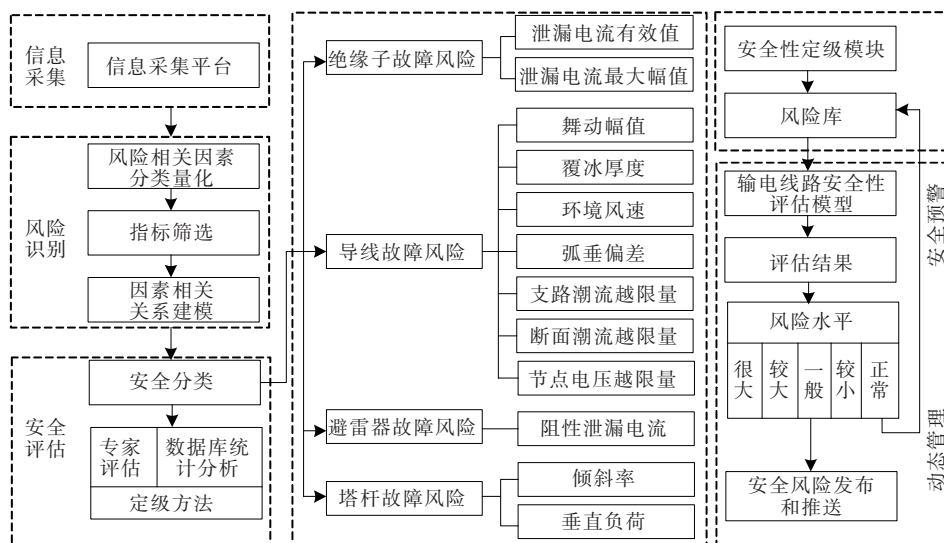


图4 输电线路安全性评估与动态管理模式

Figure 4 Process structure of transmission line safety assessment and dynamic management

为确保输电线路的安全运行,首先进行数据采集工作,以便为后续输电线路风险评估和辨识提供数据支撑;其次开展风险识别工作,该部分主要针对输电线路的薄弱点进行分析、归纳和总结,筛选出典型的安全风险指标;然后结合本文建立的安全性评估模型,开展输电线路的安全性评估工作,根据评估结果分析线路运行的风险水平;最后结合相关系统部门开展安全风险的预警和发布工作。

4 实证分析

以某地区 220 kV 电网为例,选取其系统内的 3 条输电线路(L₁、L₂、L₃)为研究对象,将输电线路运行安全风险分为很大(Ⅳ级)、较大(Ⅲ级)、一般(Ⅱ级)、较小(Ⅰ级)4 个等级,以 12 月典型日数据为样本,根据本文提出的输电线路评估模型对其 3 条线路开展安全性分析。

4.1 安全性评估的经典域、节域及待评物元构造

输电线路安全风险评估指标在不同风险等级下的范围区间目前并没有明确的规范标准,本文根据电网企业专家意见,对各评价指标在不同风险等级下的区间进行了划分。根据统计数据 and 指标风险区间划分结果,计算得到归一化后的经典域矩阵为

$$R_N = \begin{matrix} & \text{I级} & \text{II级} & \text{III级} & \text{IV级} \\ \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \\ x_9 \\ x_{10} \\ x_{11} \\ x_{12} \end{matrix} & \begin{matrix} (0, 0.28) \\ (0, 0.30) \\ (0, 0.32) \\ (0, 0.22) \\ (0, 0.29) \\ (0, 0.28) \\ (0, 0.33) \\ (0, 0.28) \\ (0, 0.28) \\ (0, 0.28) \\ (0, 0.31) \\ (0, 0.31) \end{matrix} & \begin{matrix} (0.28, 0.61) \\ (0.30, 0.63) \\ (0.32, 0.55) \\ (0.22, 0.59) \\ (0.29, 0.56) \\ (0.28, 0.61) \\ (0.33, 0.71) \\ (0.28, 0.77) \\ (0.28, 0.78) \\ (0.28, 0.73) \\ (0.31, 0.67) \\ (0.31, 0.70) \end{matrix} & \begin{matrix} (0.61, 0.87) \\ (0.63, 0.86) \\ (0.55, 0.81) \\ (0.59, 0.87) \\ (0.56, 0.87) \\ (0.61, 0.91) \\ (0.71, 0.89) \\ (0.77, 0.93) \\ (0.78, 0.93) \\ (0.73, 0.88) \\ (0.67, 0.84) \\ (0.70, 0.92) \end{matrix} & \begin{matrix} (0.87, 1) \\ (0.86, 1) \\ (0.81, 1) \\ (0.87, 1) \\ (0.87, 1) \\ (0.91, 1) \\ (0.89, 1) \\ (0.93, 1) \\ (0.93, 1) \\ (0.88, 1) \\ (0.84, 1) \\ (0.92, 1) \end{matrix} \end{matrix}$$

对于节域矩阵内的各指标区间为经典域区间

的上下限,根据 R_N可知,本案例中的节域指标范围均为(0,1)。

选取输电线路 12 月某天的指标监测值,计算并根据文 1.2 的无量纲化处理步骤,得出待评物元矩阵为

$$R_0 = \begin{matrix} & L_1 & L_2 & L_2 \\ \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \\ x_9 \\ x_{10} \\ x_{11} \\ x_{12} \end{matrix} & \begin{matrix} 0.12 \\ 0.23 \\ 0.67 \\ 0 \\ 0.75 \\ 0.34 \\ 0.11 \\ 0.10 \\ 0.26 \\ 0.20 \\ 0 \\ 0.21 \end{matrix} & \begin{matrix} 0.09 \\ 0.19 \\ 0.45 \\ 0 \\ 0.51 \\ 0.30 \\ 0.03 \\ 0.07 \\ 0.43 \\ 0.21 \\ 0 \\ 0.22 \end{matrix} & \begin{matrix} 0.08 \\ 0.20 \\ 0.76 \\ 0 \\ 0.79 \\ 0.24 \\ 0.14 \\ 0.12 \\ 0.37 \\ 0.18 \\ 0 \\ 0.25 \end{matrix} \end{matrix}$$

4.2 评估指标权重及安全性评级计算

采用文 2 权重计算方法,计算各安全性评估指标的权重如表 2 所示。

根据式(15)可计算出 3 条输电线路与各等级的关联系数和线路的安全运行水平情况,计算得到各线路风险等级情况结果如表 3 所示。

以线路 L₃ 为例,其各指标与风险等级的关联系数计算结果如表 4 所示,指标风险等级情况如图 5 所示。

表 2 指标权重
Table 2 Weights of indices

二级指标	指标权重	三级指标	指标权重
绝缘子故障风险	0.121	x ₁	0.019
		x ₂	0.013
		x ₃	0.109
		x ₄	0.109
		x ₅	0.110
导线故障风险	0.532	x ₆	0.110
		x ₇	0.122
		x ₈	0.110
		x ₉	0.111
		x ₁₀	0.010
避雷器故障风险	0.118	x ₁₁	0.133
		x ₁₂	0.034
塔杆故障风险	0.229		

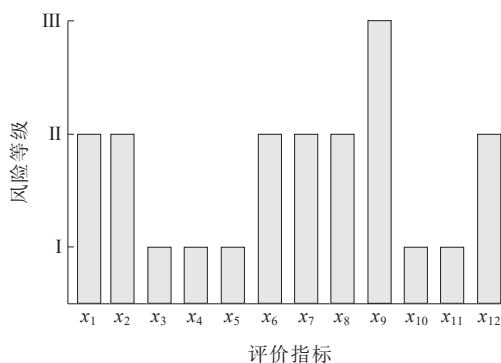
表3 输电线路安全性评估结果

Table 3 Evaluation results of the transmission lines

线路	IV	III	II	I
L ₁	-0.12	-0.19	-0.25	0.19
L ₂	-0.24	-0.18	-0.42	0.13
L ₃	-0.21	-0.23	0.38	-0.24

表4 输电线路L₃各指标关联系数Table 4 Correlation coefficients of each index of transmission line L₃

指标	IV	III	II	I
x ₁	-0.14	-0.24	0.13	0.09
x ₂	-0.18	-0.04	0.21	0.15
x ₃	-0.37	-0.41	-0.20	-0.03
x ₄	-0.35	-0.39	-0.26	-0.02
x ₅	-0.11	-0.46	-0.19	0.15
x ₆	-0.16	-0.43	-0.06	-0.21
x ₇	-0.19	-0.36	-0.10	-0.42
x ₈	-0.31	-0.26	0.12	-0.24
x ₉	-0.37	0.31	-0.19	-0.11
x ₁₀	-0.12	-0.34	-0.39	0.10
x ₁₁	-0.21	-0.11	-0.32	-0.04
x ₁₂	-0.39	-0.29	-0.13	-0.29

图5 输电线路L₃各指标风险等级Figure 5 Risk level of each index of the transmission line L₃

4.3 结果分析

根据物元可拓理论的定义,评价指标或待评对象与某一等级的关联系数越大,则指标或评价对象的状态越贴近于该等级。由表3可知,线路L₁、L₂与等级I的关联系数最大,表示线路L₁、L₂在本月的气象条件下运行状态良好,面临的潜在运行风险较小,而线路L₃与等级II的关联系数最大,表明该线路运行状态存在潜在运行安全风险。

分析引起线路L₃运行风险的因素:根据物元可

拓模型的定义可知,指标与各等级的关联系数影响投资效益评级结果。由表4中线路L₃各指标风险等级的计算结果可以发现,该线路评级指标有“潮流越限量”、“泄漏电流”等6个指标运行评级为等级II,即存在一定运行风险。此外,尤其是指标“节点电压越限量”的评级结果为等级III,即存在着较大运行风险,在所有指标中表现最差,而根据对SCADA系统中的历史数据查询发现,该典型日线路L₃存在电压越限问题。针对线路L₃指标出现的运行风险问题,可考虑适时开展线路系统的无功优化工作,以提高线路的安全运行水平。

5 结语

本文提出考虑气象因素情形下的输电线路安全性评估模型,以气象条件对输电线路各部分的影响为出发点,建立反映输电线路安全性运行水平的评价指标,并基于物元可拓理论建立输电线路的安全性评估模型,该模型可以客观地反映出输电线路在气象因素影响下面临的风险等级。此外,本文在此基础上也建立输电线路安全性评估的动态管理模式,在输电线路的安全性评估和预警方面也发挥积极作用。

参考文献:

- [1] 韩先才,孙昕,陈海波,等.中国特高压交流输电工程技术发展综述[J].中国电机工程学报,2020,40(14):4371-4386+4719.
HAN Xiancai,SUN Xin,CHEN Haibo,et al.The overview of development of UHV AC transmission technology in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(14): 4371-4386+4719.
- [2] 黄雄峰,颜城,姜岚,等.特高压输电线路新型碳纤维更换绝缘子闭式卡具力学性能研究[J].高压电器,2021,57(4):172-180.
HUANG Xiongfeng,YAN Cheng,JIANG Lan,et al.Study on mechanical properties of new carbon fiber replacement insulator closed clamps for UHV transmission lines[J]. High Voltage Apparatus, 2021,57(4): 172-180.
- [3] 李隆基,文清丰,张弛,等.沿海地区输电线路覆冰雪规律与闪络预测研究[J].电力系统及其自动化学报,2020,32(5): 93-98.
LI Longji,WEN Qingfeng,ZHANG Chi,et al.Research on

- ice-snow covering characteristics and flashover prediction of coastal-region transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 32(5): 93-98.
- [4] 孟晓承,车仁飞,高师.基于改进灰色关联分析模型的输电线路停运率估计[J].电力系统及其自动化学报,2019,31(11):86-91.
MENG Xiaocheng, CHE Renfei, GAO Shi. Outage rate estimation for transmission lines based on improved gray relational analysis model[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2019, 31(11): 86-91.
- [5] 侯慧,俞菊芳,黄勇,等.台风侵袭下输电线路风偏跳闸风险评估[J].高电压技术,2019,45(12):3907-3915.
HOU Hui, YU Jufang, HUANG Yong, et al. Risk assessment of transmission line trip caused by windage yaw under typhoon[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(12): 3907-3915.
- [6] 田鹏飞,于游,董明,等.基于CNN-SVM的高压输电线路故障识别方法[J].电力系统保护与控制,2022,50(13):119-125.
TIAN Pengfei, YU You, DONG Ming, et al. A CNN-SVM-based fault identification method for high-voltage transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(13): 119-125.
- [7] 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.
- [8] 朱益华,罗毅,段涛,等.基于输电线路实时评估模型的电力系统静态安全在线风险评估[J].电力自动化设备,2014,34(7):150-156.
ZHU Yihua, LUO Yi, DUAN Tao, et al. Integrative evaluation model of node vulnerability considering network transmission ability and anti-interference ability [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(7): 150-156.
- [9] 徐舒玮,邱才明,张东霞,等.基于深度学习的输电线路故障类型辨识[J].中国电机工程学报,2019,39(1):65-74+321.
XU Shuwei, QIU Caiming, ZHANG Dongxia, et al. A deep learning approach for fault type identification of transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(1): 65-74+321.
- [10] 费春国,霍洪双.基于电流振幅与SVM的输电线路故障分类[J].电力系统及其自动化学报,2019,31(4):139-144.
FEI Chunguo, HUO Hongshuang. Fault classification for transmission lines based on current amplitude and SVM [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 31(4): 139-144.
- [11] 周文武,江岳,张小力,等.一种求解架空输电线路单端覆冰下不平衡张力的方法[J].电网与清洁能源,2021,37(1):49-53+61.
ZHOU Wenwu, JIANG Yue, ZHANG Xiaoli, et al. A calculation method of unbalanced tension under single-ended icing on overhead transmission lines[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(1): 49-53+61.
- [12] 叶剑华,林济铿,胡世骏,等.计及气象因素的电网静态安全评估框架及模型[J].电力系统及其自动化学报,2014,26(8):65-70.
YE Jianhua, LIN Jikeng, HU Shijun et al. Index system of steady security of power grid considering meteorological factors[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2014, 26(8): 65-70.
- [13] 杨小磊,路轶,陈刚,等.区域设备最优化控制的精准配网多级画像应用研究[J].电测与仪表,2022,59(3):136-142.
YANG Xiaolei, LU Yi, CHEN Gang, et al. Research on the application of multi-level portrait of precise distribution network for optimal control of regional equipment[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(3): 136-142.
- [14] 戚日常,范慧芳,李飞,等.基于改进GSA-SVM模型的电力变压器故障诊断[J].智慧电力,2022,50(6):50-56.
XIAN Richang, FAN Huifang, LI Fei, et al. Power transformer fault diagnosis based on improved GSA-SVM model[J]. Smart Power, 2022, 50(6): 50-56.
- [15] 张成,赵涛,朱爱华,等.弱电网下并联逆变器稳定性及电能质量治理研究[J].电力工程技术,2022,41(3):224-230.
ZHANG Cheng, ZHAO Tao, ZHU Aihua, et al. Stability and power quality control of parallel inverters in weak current network[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(3): 224-230.
- [16] 李典阳,张育杰,王善渊,等.基于多预测模型融合的电力变压器安全预判[J].中国电力,2020,53(1):72-80.
LI Dianyong, ZHANG Yujie, WANG Shanyuan, et al. Safety prejudging method for power transformer based on multi-prediction model fusion[J]. Electric Power, 2020, 53(1): 72-80.
- [17] 史智萍,单体华,刘文峰,等.基于物元—可拓模型的电网运行风险综合评价[J].电网技术,2015,39(11):3233-3239.
SHI Zhiping, SHAN Tihua, LIU Wenfeng, et al. Comprehensive evaluation of power network operation risk based on matter-element extensible model[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3233-3239.