

基于 AHP 的输电线路故障关联设计参数风险评估

王旭冲

中国电建集团河南省电力勘测设计院有限公司 郑州 450007

【摘要】通过对某地区输电线路的故障进行统计分析,架空输电线常见故障包括覆冰故障、雷击故障、外力破坏、风偏闪络、山火故障,根据对故障成因进行分析,提取了各类故障密切相关的设计关键参数。采用层次分析法对故障发生概率最高的覆冰故障和雷击故障进行风险评估,得到不同设计关键参数的风险权重因子,再根据不同类型故障发生概率,得到设计关键参数的综合风险权重。结果表明,对该地区输电线路故障风险影响最大的设计参数有设计覆冰厚度、导地线间距、导(地)线安全系数、地线保护角,对输电线路安全运行的风险影响达到约60%。

【关键词】输电线路故障;风险评估;层次分析法;设计参数

Risk Assessment of Transmission Line Fault-Related Design Parameters Based on AHP

Wang Xuchong

PowerChina Group Henan Electric Power Survey and Design Institute Co., Ltd., Zhengzhou, China 450007

【Abstract】Through statistical analysis of transmission line faults in a specific region, common overhead transmission line failures were identified as icing faults, lightning faults, external damage, wind-bias flashover, and wildfire faults. By analyzing the causes of these faults, critical design parameters closely associated with each fault type were extracted. The Analytic Hierarchy Process (AHP) was employed to assess risks for icing faults and lightning faults, yielding risk weight factors for critical design parameters. Based on the probability of different fault types, comprehensive risk weights for these parameters were calculated. Results indicate that the design parameters most significantly influencing fault risks in this region are design ice thickness, conductor-ground wire spacing, safety factor of conductors (ground wires), and ground wire protection angle, collectively accounting for approximately 60% of the risk impact on safe transmission line operations.

【Key words】transmission line fault; risk assessment; AHP; design parameter

引言

在当今国内外新形势下,电力系统的发展也面临新的机遇和挑战,一方面,随着社会经济的发展和能源消费革命带来的新机遇,电力需求将持续增长;另一方面,在“碳达峰、碳中和”目标实现过程中,以特高压为代表的大容量交直流输电工程将大力建设,新能源占比也将不断提高,大容量输电工程和大规模新能源接入对主网架的安全稳定运行提出了越来越高的要求。输电线路故障对电网的冲击和产生的社会影响也将越来越大,如何对输电线路缺陷故障风险进行评估并提出针对性的提升建议,以提升电网运行的安全性,是亟待解决的问题之一。输电线路常见的故障类型包括覆冰故障、雷击故障、外力破坏故障、风偏闪络故障等,通常而言,每类故障与部分设计参数密切相关,评估关联设计

参数的风险权重,针对性的加强,对提高线路可靠性具有重要意义。

本文结合某地区输电线路故障数据,对影响各类故障的设计关键参数进行了分析,结合各类故障发生概率,采用层次分析法(Analytic Hierarchy Process,以下简称AHP),对各类故障关联的设计关键参数风险权重进行评估,得到各设计参数的权重。

1 输电线路故障统计分析

通过对某地区输电线路近年来发现的故障进行归类分析,输电线路常见故障主要有5类,按照故障所占比例大小排序依次为:覆冰故障、雷击故障、外力破坏、风偏闪络、山火故障。每类故障占比及成因如表1所示。

表 1 输电线路故障占比及成因分析

故障类型	占比	成因
覆冰故障	65%	(1) 覆冰过载: 实际覆冰厚度超过设计冰厚, 超出导线、金具承载能力发生故障; (2) 脱冰跳跃: 导线脱冰时跳跃导致间距不足, 放电引发故障; (3) 绝缘子串覆冰闪络: 覆冰导致绝缘子串桥接, 爬电距离变小引发闪络故障。
雷击故障	19%	(1) 直击: 即雷电绕过导线直接击中导线, 通常导致线路故障概率很大; (2) 反击: 雷击避雷线或塔顶后, 击穿绝缘造成的故障, 低电压等级反击故障概率就较高, 高电压等级绝缘配置高, 反击引发故障概率较低。
外力破坏	8%	外力破坏种类繁多, 包含树木砍伐、建筑施工、采石爆破、车辆冲撞、漂浮物等造成的输电线路故障。
风偏闪络	5%	风偏故障是指导线和绝缘子串在强风作用下产生摇摆偏离初始位置, 当其与邻近物体空气间隙小于安全距离时产生风偏闪络, 就会引起输电线路跳闸。
山火故障	3%	(1) 空气绝缘性下降: 山火产生的高温浓烟会使空气绝缘性能急剧下降, 引发线路闪络跳闸; (2) 设备损坏引发故障: 导线、绝缘子、杆塔等受到高温后熔化、机械强度下降, 进而导致故障。

从上述故障数据统计分析结果可以看出, 输电线路故障占比最高的两类为覆冰和雷击, 占到故障的 80% 以上, 严重威胁输电线路的安全稳定运行, 应作为重点关注对象。

2 输电线路故障风险关联设计参数

(一) 覆冰故障

(1) 设计覆冰厚度

线路设计覆冰厚度与线路发生覆冰故障有着最直接的关系, 在正常情况下, 线路发生覆冰故障通常是因为实际覆冰超出了设计覆冰厚度, 如果设计覆冰厚度选择偏小, 实际覆冰厚度超出设计值较多, 可能导致导线断线。

(2) 导线间距

线路覆冰时, 导线覆冰、脱冰以及厚度通常不是同步的, 导线间距选择不合理可能导致覆冰和脱冰过程中间距不足闪络。

(3) 导线安全系数

覆冰会使输电线路的杆塔、导线、地线及金具等垂直荷载显著增加, 水平荷载也会随着导线迎风面覆冰厚度的增加而增大。若导线放线张力选择不合理, 可能导致在覆冰状态下其安全系数无法满足规程规范要求, 就可能导致故障。

(4) 导线预绞式金具参数

预绞式金具故障是重覆冰线路最容易出现的金具故障

之一, 线路在覆冰、大高差和大档距时, 由于导线不平衡张力增大, 线夹出口角超限等原因, 预绞式线夹握力不能满足运行要求, 导致线夹损坏。

(5) 档距高差比

在一定档距条件下, 高差过大会造成导线悬点应力和导线悬垂角过大, 从而导致导线损坏。

(6) 导线不平衡张力

平衡张力主要是由于气象条件变化、档距和高差的不同、覆冰不均匀等因素引起的直线杆塔上导线张力不等, 从而产生的水平张力差, 可导致直线塔倒塌和损坏。

(7) 覆冰同时风速

根据规程规范的要求, 设计覆冰工况的气温宜采用 -5°C , 风速对轻、中冰区宜采用 10m/s , 对重冰区宜采用 15m/s 。

在实际运行中, 覆冰时的风速可能超出上述值, 就可能导致线路受到的荷载超出设计值而发生故障。

(二) 雷击故障

(1) 导线保护角

导线保护角主要影响输电线路遭受雷电绕击的概率, 从调研结果来看, 输电线路雷击跳闸通常是由绕击引起的, 反击通常都会重合闸成功, 因此绕击应重点关注。

(2) 接地电阻

接地电阻是影响输电线路反击故障的一个重要指标。当雷电击打在避雷线或杆塔上, 若杆塔接地电阻过高, 雷电流

无法迅速有效地泄导至大地，会使地线和杆塔电位大幅升高，导致导线与杆塔间的电位差增大，杆塔更容易向导线放电，从而引发反击雷故障。

(3) 雷暴日/地闪密度

雷暴日是衡量一个地区雷电活动频繁程度的重要指标，雷暴日数越多，意味着该地区雷电活动越频繁，架空输电线路遭受雷击的概率也就越大，从而导致雷击故障发生的可能性增加。

(4) 地线直径

地线直径越大，其横截面积越大，电阻越小，载流能力越强。在雷击发生时，较粗直径的地线能够更顺畅地传导雷电流，减少因雷电流过大导致地线发热甚至熔断的风险，从而降低因地线损坏而引发的雷击故障概率。

(5) 绝缘子干弧距离

绝缘子干弧距离是指两个金属附件之间外部空气间的最短距离这一参数在输电线路的防雷设计中至关重要，因为它直接影响到绝缘子的雷电冲击耐受水平，从而影响整条线路的安全性和可靠性。

(6) 杆塔全高

输电线路杆塔高度高，更容易遭受雷击，当全高较高或杆塔处于山顶等位置时，遭受雷击的可能性会更高。

(三) 其他故障

相比覆冰和雷击故障，其他故障占比很低，本文不再详细论述和一一评估，对主要设计参数进行列举。

外力破坏：主要指杆塔、基础、导地线等元件受到外物侵袭而损坏故障，相关的设计参数主要包括导线对地距离、导线对路等跨越物垂直距离、铁塔对路距离等。

风偏闪络：主要是大风时导线风偏对杆塔、地物距离不够而闪络，相关的设计参数主要包括设计风速、导线风偏角等。

山火故障：关键的设计参数主要包括导线对地距离、绝缘子等材料耐受温度等。

3 AHP 风险评估法

AHP 是由美国 Saaty 教授提出的一种定性定量相结合的决策方法，它把复杂问题分解为若干有序层次，并根据对一定客观事实的判断，就每一层次的相对重要性，给予定量表示，利用数学方法确定出每一层次的全部元素相对重要次序的数值，并通过对各层次的分析导出对整个问题的分析。

(一) 构造判断矩阵

对于每个设计参数，邀请专家根据经验进行比较赋值，以 a_{ij} 表示，矩阵元素 a_{ij} 的含义为：第 i 行单元相对于第 j 列单元的重要性标度值。一般采用 1~9 的比例标度，如表 2。

表 2 判断矩阵元素比较的比例标度

标度	含义
1	表示两个元素相比，具有同样重要性
3	表示两个元素相比，前者比后者稍重要
5	表示两个元素相比，前者比后者明显重要
7	表示两个元素相比，前者比后者强烈重要
9	表示两个元素相比，前者比后者极端重要
2, 4, 6, 8	表示上述相邻判断的中间值

对于 n 个元素来说，两两比较判断矩阵 A 为：

$$A = (a_{ij})_{n \times n} \quad (1)$$

判断矩阵具有如下性质：

$$\begin{aligned} a_{ij} &> 0 \\ a_{ij} &= \frac{1}{a_{ji}} \\ a_{ii} &= 1 \end{aligned} \quad (2)$$

(二) 一致性检验

为保证计算结果的科学性、合理性，应先对专家打分矩阵进行一致性检验，一致性检验 CR 公式为：

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3)$$

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (4)$$

式中：CI 为一致性指标；RI 为判断矩阵的平均随机一致性指标，是一个与矩阵阶数相关的常数，不同阶数矩阵的 RI 值见表 3； $\lambda_{\max}$ 为判断矩阵的最大特征根； n 为判断矩阵的阶数。

当 $CR < 0.1$ 时，认为判断矩阵的一致性良好，反之则认为判断矩阵不具备一致性，此专家所填写的判断矩阵应当舍弃。

表 3 层次分析法不同阶数矩阵 RI 的取值

矩阵阶数	1	2	3	4	5	6	7	8
RI 取值	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41

(三) 确定权重

对符合一致性检验的判断矩阵进行权重计算。

(1) 对判断矩阵的每一列做归一化处理

$$\bar{a}_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}, \quad i, j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (5)$$

(2) 对每一行元素进行求和

$$\bar{M}_i = \sum_{j=1}^n \bar{a}_{ij}, \quad i, j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (6)$$

(3) 归一化处理

$$W_i = \frac{\bar{M}_i}{\sum_{i=1}^n \bar{M}_i}, \quad i, j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (7)$$

式中: a_{ij} 为判断矩阵第 i 行第 j 列的值; $\bar{a}_{ij}$ 为判断矩阵第 i 行第 j 列归一化处理后的值; $\bar{M}_i$ 为归一化判断矩阵第 i 行的和; W_i 为判断矩阵第 i 行所占的权重。

所得特征向量即为指标的权重向量。

$$W = (W_1, W_2, \dots, W_n)^T \quad (8)$$

4 风险评估结果

表 4 影响线路安全的设计参数风险权重评估结果

设计参数	设计覆冰厚度	导地线间距	导(地)线安全系数	地线金具参数	档距高差比	导地线不平衡张力
权重	27.9%	16.5%	7.6%	4.2%	2.9%	3.3%
设计参数	覆冰同时风速	地线保护角	接地电阻	雷暴日/地闪密度	地线直径	绝缘子干弧距离
权重	2.7%	7.2%	2.3%	2.9%	2.3%	2.9%
设计参数	塔全高	外力破坏相关参数		风偏闪络相关参数	山火故障相关参数	
权重	1.5%	8%		5%	3%	

根据评估结果,对输电线路故障风险影响最大的设计参数为设计覆冰厚度、导地线间距、导(地)线安全系数、地线保护角,对输电线路故障发生的影响权重达到约 60%。

结语

架空输电线常见故障包括覆冰故障、雷击故障、外力破坏、风偏闪络、山火故障,每类故障关联的设计参数有所不同。本文对不同类型故障成因进行了分析研究,提取了与各

针对影响覆冰故障和雷击故障的关键设计参数,邀请多位专家对判断矩阵进行打分,进行一致性检验后,对有效矩阵进行权重计算,分别得到覆冰和雷击故障相关的设计参数权重向量。

覆冰故障:

$$W=[0.429, 0.254, 0.116, 0.065, 0.044, 0.05, 0.042]$$

雷击故障关联关键设计参数权重向量:

$$W=[0.379, 0.121, 0.151, 0.122, 0.15, 0.077]$$

根据表 1 不同类型故障的占比,与相应故障权重向量相乘,得到不同设计参数的故障风险权重,如表 4 所示。

类故障关联密切的设计关键参数,选择发生概率最高的覆冰故障和累计故障,邀请专家采用层次分析法对关联的关键设计参数进行风险评估,再根据不同类型故障发生概率,得到设计关键参数的综合风险权重。

结果表明,对输电线路故障风险影响最大的设计参数主要有设计覆冰厚度、导地线间距、导(地)线安全系数、地线保护角,对输电线路安全运行的风险影响达到约 60%。在输电线路设计中,应尤其注意对上述设计参数的评估,以提高输电线路运行的安全性。

参考文献

- [1]李晖,刘栋,姚丹阳.面向碳达峰碳中和目标的我国电力系统发展研判[J].中国电机工程学报,2021,41(18):6245-6259.
- [2]陆佳政,周特军,吴传平,李波,谭艳军,朱远.某省级电网 220kV 及以上输电线路故障统计与分析[J].高电压技术,2016,42(01):200-207.
- [3]宋耐超,王瑞琦,李明明等.多自然灾害下的架空输电线路运行风险评估[J].电力系统保护与控制,2021,49(19):65-71.
- [4]周特军,陆佳政,吴传平等.湖南电网山火告警风险及故障时间间隔分布规律[J].电力系统自动化,2018,42(10):135-142.
- [5]邓红雷,周晨,夏桥.基于综合赋权法和模糊层次分析法的输电线路异物挂线故障率模型[J].电气自动化,2019,41(04):30-32+36.
- [6]叶万余,苏超,罗敏辉,曾勇斌,颜祖明,刘义.基于关联规则挖掘的输电线路缺陷状态预测[J].电力系统保护与控制,2021,49(20):104-111.

作者简介:王旭冲(1993-),男,硕士,工程师,注册电气工程师,主要从事高压输电线路设计与咨询工作。