

DOI: 10.7667/PSPC150779

基于层次化、差异化的架空输电线路雷击风险评估

邓红雷, 李述文, 戴 栋

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510641)

摘要: 对当前架空输电线路雷击风险评估常用的雷害分布图法和雷击定量计算法进行了研究。针对这两种方法的不足, 提出了“杆塔-杆塔区段-线路”差异化、多层次的雷击风险评估模型。以地闪密度为评估指标, 同时充分考虑线路本身耐雷水平、周边地形地貌情况以及历史雷击跳闸事故等情况, 计算并划分各基杆塔风险等级, 确定杆塔易闪区段。同时利用层次分析法, 评估各风险区段对整个输电线路的影响系数, 逐层实现了整条线路雷击风险的综合评估。最后, 通过实际案例验证了该评估模型的可行性。

关键词: 雷击风险评估; 风险等级; 架空输电线路; 地闪密度; 风险区段

Lightning risk assessment of overhead transmission line based on hierarchical and differentiation

DENG Honglei, LI Shuwen, DAI Dong

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: This paper studies the lightning hazard distribution maps and lightning strike quantitative calculation methods which are commonly used for lightning risk evaluation of overhead transmission presently, in view of the deficiency of those two methods, the “tower-tower section-line” differentiation and multi-level evaluation model is proposed. The density of ground lightning serves as the evaluation index in the proposed model. Also, the model takes the lightning withstand level of transmission line, the surrounding topography and history of lightning trip out accidents into account. According to the model, the risk grade of each tower is calculated and divided to determine the tower section that is easy to flashover. And then the paper evaluates the influence coefficient of the risk section to the whole transmission line based on the analytic hierarchy method. Accordingly, the comprehensive risk assessment of lightning for the whole line is evaluated step by step. Finally, the feasibility of this evaluation model is verified by a practical case.

This work is supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2014ZM0031) and National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2012AA050209).

Key words: lightning risk evaluation; risk level; overhead transmission line; ground lightning density; risk section

0 引言

近年来, 尽管随着防雷设施和控制策略的不断改进, 雷击灾害造成的损失有所下降, 但从总体上看, 雷击跳闸是架空输电线路安全稳定运行的最大威胁^[1-4]。在改善防雷措施的同时, 如何实现架空输电线路雷击风险的可靠评估, 进而在线路防雷薄弱地段采取相应的行之有效的防雷措施, 对于电网的安全稳定运行具有重要意义^[5-7]。

目前, 线路雷击风险评估方法主要可以归纳为雷害分布图划分法和雷击定量计算法。

雷害分布图划分法根据雷电定位系统数据, 对落雷参数进行统计, 并据此划分雷害分布图, 以表征线路周边雷电活动强弱情况^[8]。其实现形式主要可分为网格统计法、线路走廊统计法、与杆塔耐雷水平相结合的雷击灾害分布图划分法。网格统计法针对选定区域进行等面积网格划分, 每个网格即为一个雷电统计单元, 由此绘制得到区域电网的地闪密度分布图等各类分布图^[9]。而线路走廊统计法则是统计分析某条线路走廊范围内的雷电参数, 对单条线路的雷击跳闸分析更具有针对性^[10]。而与杆塔耐雷水平相结合的雷击灾害分布图划分法是陈家宏

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2014ZM0031); 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2012AA050209)

在以上两种方法的基础上改进并提出的^[11]，在考虑线路本身耐雷水平的基础上绘制雷击灾害分布图，具有更可靠的评估效果。

雷击定量算法从定量角度进行线路雷害分析，主要包括规程法及其改进算法、经典电气几何模型法(EGM)及其改进算法。规程法是依照电力行业标准 DL/T620-1997《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》^[12]，根据系列模拟试验以及现场经验的统计结果建立起的近似解析计算方法。规程法统一换算到了相同的计算条件，而其改进算法则根据当地情况对落雷密度、年平均雷暴日、雷电流幅值概率分布曲线等雷电参数重新修正，据此计算雷击跳闸率^[13-15]。经典电气几何模型(EGM)是将雷电的放电特性与输电线路的结构尺寸关联起来而建立的几何计算模型^[16-18]，其与实际运行经验较为符合，并得到了广泛的应用。改进电气几何模型考虑了更多的实际问题，如“上行先导”问题等，弥补了EGM的不足，主要有 Eriksson 模型、Rizk 模型等^[19]。

上述雷击风险评估方法存在各自的优缺点。雷害分布图划分法直观明了，但不能反映线路本身耐雷情况，雷击定量算法考虑全面，较为综合地反映了线路雷害水平，但是方案计算过程繁琐，数据需求量大，在目前线路数据库不够完备的情况下，其效果的发挥往往受到限制。为了利用上述方案的优点，克服其不足，本文将上述两种方案结合起来，

提出了“杆塔-杆塔区段-线路”差异化、多层次化雷击风险评估方法。

1 层次化雷击风险评估基本方案

“杆塔-杆塔区段-线路”层次化雷击风险评估方法充分考虑了各线路之间以及线路各基杆塔之间雷击风险水平的差异性，建立各基杆塔雷害风险水平，划分杆塔雷击风险等级及相应的杆塔区段，确定易闪线路段，并依据各风险区段对整条线路防雷效果影响程度的不同，综合评估整条输电线路的雷击风险发生概率，最终形成了“杆塔-杆塔区段-线路”差异化、多层次的雷击风险评估模型，如图 1 所示。该评估模型主要分为以下三个阶段：

(1) 杆塔评估阶段。选择地闪密度和雷电流幅值表征雷电活动情况，选择接地电阻表征杆塔耐雷水平，选择地形地貌表征线路周边环境对雷电屏蔽效果的影响，对这些评估指标进行加权计算，初步评定杆塔雷击风险等级，并考虑杆塔历史雷击跳闸情况，修正并确定各基杆塔雷击风险等级。

(2) 杆塔区段评估阶段。统计各风险等级杆塔数量，并计算其所占比例，分析线路易闪区段。

(3) 线路评估阶段。利用层次分析法评估各风险等级对整条线路跳闸的影响程度，确定风险等级权重，并与各风险等级杆塔数量比例相乘得到整条线路的雷击风险发生概率评估值。

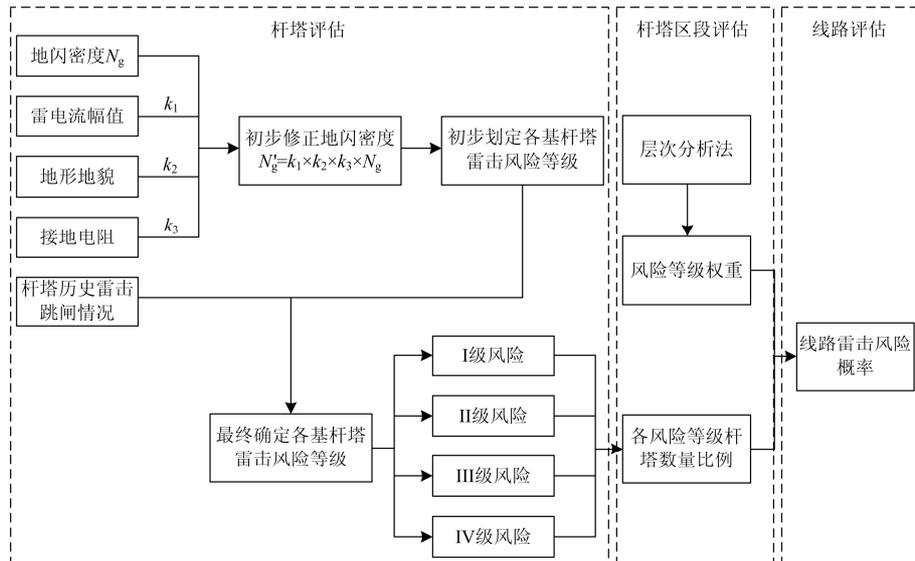


图 1 架空输电线路层次化雷击风险评估基本模型

Fig. 1 Basic lightning risk assessment model of overhead transmission line based on hierarchical

该评估模型综合考虑了杆塔耐雷水平、线路走廊雷电活动情况、线路周边环境对雷电的屏蔽作用，差异化评估各基杆塔的雷害风险水平；通过划分各

风险等级杆塔区段，为找到线路防雷薄弱点并确定线路易闪区段提供了有力的支持和帮助；从杆塔区段到线路，分层次逐步实现了各条线路的雷击风险

概率评估, 有利于对比分析各线路的耐雷水平及防雷效果差异性, 为线路防雷措施的改进提供合理的参考。

2 层次化雷击风险评估基本流程

按照上述基本方案, “杆塔-杆塔区段-线路”层次化雷击风险评估模型基本流程如下。

(1) 杆塔雷击风险等级的划分

落雷是引发线路跳闸的先决条件, 本文将地闪密度作为雷电活动强弱的评价标准, 并据此进行杆塔雷击风险等级的划分。

国际大电网会议(CIGRE)提出经验公式 $N_g=0.023T_d^{1.3}$ ^[20], 建立了雷暴日与地闪密度之间的关系。而规程法规定, 年平均雷暴日 T_d 不超过 15 的地区为少雷区, 超过 15 但不超过 40 的地区为中雷区, 超过 40 但不超过 90 的地区为多雷区, 超过 90 的地区为雷电特殊强烈地区。因此, 可以根据规程法雷区划分标准, 相应地建立起以地闪密度 N_g 为指标的划分标准, 对杆塔雷击风险等级进行划分。但考虑到规程法雷区的划分是针对全国落雷情况, 我国地域辽阔, 各地落雷和地闪密度值差异较大, 为避免线路评估的风险等级完全由当地落雷情况决定, 还需要根据当地情况对上述杆塔风险等级划分标准进行修订。

(2) 线路各基杆塔地闪密度的统计

线路周边落雷不可能都会引起跳闸事故, 只有线路周边两倍于走廊宽度范围内的雷击才有可能对线路造成影响^[21]。本文根据单档距走廊法, 利用 ArcGIS 强大的地理数据统计功能, 对以每基杆塔为中心、1 km 为半径的圆形区域范围内的落雷次数进行统计, 并计算地闪密度值。

(3) 线路各基杆塔雷击风险等级的修正及确定

在确定单基杆塔雷击风险等级时, 还需要综合考虑线路本身耐雷水平、周边地形地貌情况以及雷电流幅值情况等的影 响, 本文通过修正地闪密度以间接反映这些因素的作用, 具体表达式为

$$N_g' = k_1 k_2 k_3 N_g \quad (1)$$

根据前述影响因素对线路跳闸作用的分析, 并参照规程法相关内容及专家经验知识, 初步设定系数 k_1 、 k_2 、 k_3 的取值如表 1~表 3 所示, 其值可根据实际情况进行调整。

表 1 系数 k_1 的取值

年均雷电流幅值 /kA	$I \leq 15$	$15 < I \leq 30$	$I > 30$
k_1	1	1.1	1.2

表 2 系数 k_2 的取值

杆塔接地电阻 R_f/Ω	$R_f \leq 7$	$7 < R_f \leq 15$	$R_f > 15$
k_2	1	1.2	1.4

表 3 系数 k_3 的取值

地形地貌	平地	山坡	山顶
k_3	1	1.3	1.5

此外, 根据上述影响因素的分析, 若某基杆塔历史上发生雷击跳闸事故, 其再次发生的概率大大增加。因此, 还需要考虑杆塔历史雷击跳闸情况, 若某基杆塔近 1 年发生过雷击跳闸事故, 则直接将该基杆塔的雷击风险提升一个等级。

利用以上各表及公式计算求得修正后的地闪密度, 并根据杆塔风险等级划分标准最终确定各基杆塔的雷击风险等级。

(4) 各雷击风险等级杆塔数量比例值的计算

根据步骤(3)中所确定的各基杆塔的雷击风险等级, 分别统计处于 I、II、III、IV 级的杆塔数量, 并由此计算各级风险等级杆塔在整条线路杆塔中所占的比例 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 。

(5) 各风险等级杆塔比例权重系数的确定

应用层次分析法, 确定各风险等级对应的权重系数 α_1 、 α_2 、 α_3 、 α_4 。

(6) 当前架空输电线路雷击风险概率估值计算

根据上述确定的各风险等级杆塔比例及其权重系数, 计算整条输电线路雷击风险概率值。整条输电线路雷击风险概率估值计算公式为

$$Risk = \alpha_1 L_1 + \alpha_2 L_2 + \alpha_3 L_3 + \alpha_4 L_4 \quad (2)$$

3 层次化雷击风险评估模型应用

广西电网某 500 kV 架空输电线路周边雷电活动频繁, 线路时常发生雷击跳闸事故。本文将上述评估模型应用于该线路, 依次分层次实现了“杆塔-杆塔区段-线路”的雷击概率风险评估。

3.1 杆塔评估

多层次雷击风险评估模型的最低层是实现线路各基杆塔雷击风险等级的划分, 确定易遭受雷击的杆塔。根据雷击风险评估模型, 对落雷参数以及线路台账数据进行统计, 包括地闪密度、年均雷电流幅值、接地电阻、地形地貌、历史雷击跳闸次数。线路台账数据以及雷击跳闸记录可以直接从线路运维部门获取, 而地闪密度则将雷击定位系统及杆塔经纬度数据导入 ArcGIS 进行线路各基杆塔周边 1

km 范围内落雷次数的统计和计算。

图 2 显示的是 ArcGIS 所统计的 2014 年 3 月份该线路及周边落雷情况示意图，可以清晰地看到线路周边区域落雷分布情况。图 3 是局部放大图，显示了该线路 27#至 83#杆塔周边 1 km 范围内落雷情况，其中方框内 61#至 83#杆塔该月总计遭受 10 次雷击，是该线路易闪段，需要重点关注。

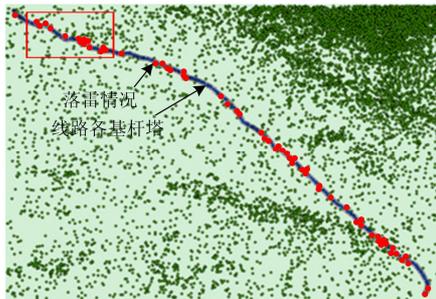


图 2 线路走廊范围内落雷点的筛选

Fig. 2 Ground lightning screening within the scope of line corridors

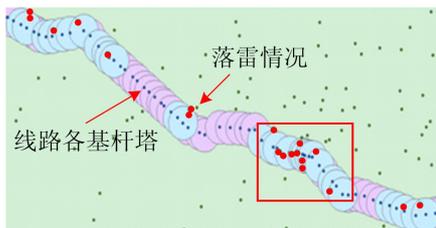


图 3 27#至 83#杆塔周边 1 km 范围内落雷示意图

Fig. 3 Ground lightning diagram of 27 # and 83 # tower around 1 km range

本文以年度为单位，对线路全年落雷情况进行分析，并以此评估线路未来几年的雷击风险。本文选用了该线路 2010 年雷击定位系统数据以及线路台账数据进行雷击风险评估，并利用 2011 年至 2013 年雷击跳闸数据分析该评估结果的可靠性。

利用 Matlab 编程实现上述雷击风险概率评估算法，将各基杆塔的地闪密度、年均雷电流幅值、接地电阻、地形地貌等数据导入程序中进行风险评估，各基杆塔地闪密度统计情况及风险评估值结果如图 4 所示。

由图 4 可见，地闪密度与风险评估值变化趋势大致相同，地闪密度出现较大值时，风险评估值也很大，两者具有较强的相关性。图中出现了多处峰值，尤其是 280#至 387#杆塔区段，风险评估值达到 20 及以上，相应的地闪密度值也在 15 次/(km²·年)及以上，这些地段属于雷电多发地带，线路发生雷

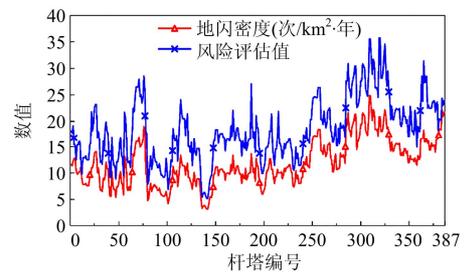


图 4 某线路 2010 年地闪密度及风险评估值

Fig. 4 Ground flash density and risk assessment values of a certain line in 2010

击跳闸的概率较大，近些年来该线路段也发生过多次跳闸事故，需要给予重点关注。

同时也注意到，在图中多个地方，地闪密度与风险评估值出现了不同步情况，说明此风险评估方案不仅仅考虑了地闪密度的影响，还充分考虑了其他因素的作用。

3.2 杆塔区段评估

一条线路杆塔数量往往较多，特别是跨区域电网远距离输电线路可达上千基杆塔，若仅仅只给出各基杆塔的风险等级，则不能较为直观地反映线路防雷薄弱点，不便于线路运维部门针对性地快速发现线路易闪段。为此，本文对杆塔风险评估值进行了划分，形成杆塔区段评估。

本文所采用的线路位于广西省境内，当地属于多雷区，年均雷暴日达八十多天，相应的地闪密度值也偏高。据统计数据，2010 年该线路杆塔周边 1 公里范围内杆塔平均地闪密度值为 12.7 次/(km²·年)。据此，在经验公式 $N_g=0.023T_d^{1.3}$ 基础上进行了修正，计算结果如表 4 所示。

$$N_g = 12.7 + 2.52 \times 0.023T_d^{1.3} \quad (3)$$

表 4 某线路杆塔雷击风险等级划分标准

Table 4 Tower lightning risk grade division standard of a certain line

风险等级	IV 级	III 级	II 级	I 级
地闪密度 N_g / (次/年·km ²)	$N_g \leq 14.67$	$14.67 < N_g \leq 19.71$	$19.71 < N_g \leq 32.81$	$N_g > 32.81$

此外，还需要考虑杆塔历史雷击跳闸情况，若某基杆塔近两年发生过雷击跳闸故障，则将该杆塔雷击风险等级提升一个等级。

按照上述标准所得到的杆塔风险等级划分结果如图 5 所示。

其中，处于 II 级风险及以上的杆塔数量达到 144 基，占 37.21%，绝大部分位于重雷区，这些杆

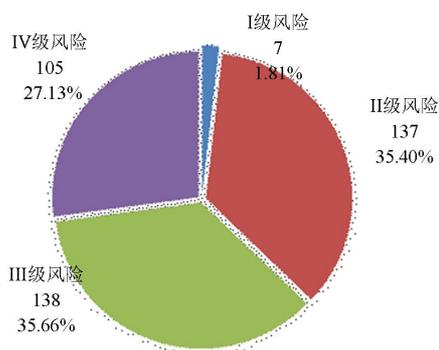


图 5 处于各风险等级的杆塔数量百分比示意图

Fig. 5 The number percentage of poles at all risk levels

塔雷击风险概率很大。根据统计数据, 该线路总计发生过 20 次雷击跳闸事故, 其分布情况如表 5 所示。

表 5 该线路 6 年跳闸事故分布情况

Table 5 Distribution of tripping accident of a certain line in 6 years

年份	总跳闸次数	I 级	II 级	III 级	IV 级
2008	3	1	2	0	0
2009	2	1	1	0	0
2010	2	0	1	0	1
2011	1	0	1	0	0
2012	1	1	0	0	0
2013	1	0	1	0	0
合计	10	3	6	0	1

(1) 总体上看, 2008 年至 2013 年该线路总计发生过 10 次雷击跳闸事故, 其中 II 级及以上风险区段总计发生了 9 次跳闸, 占总雷击跳闸次数的 90%; 其中, II 级风险区段 137 基杆塔中有 6 基发生了雷击跳闸, 而 I 级风险区段 7 基杆塔中有 3 基发生了雷击跳闸。杆塔评估的风险等级越高, 该杆塔发生雷击跳闸事故的概率越大, 可见本文所提出的雷击风险评估模型实用, 且评估效果好。

(2) IV 级风险区段发生过 1 次跳闸事故, 经查阅该线路雷击故障报告, 2010 年 8 月 16 日, 线路发生跳闸的 29#杆塔一带有大暴雨, 并伴有强烈的雷电声, 但雷电定位系统并未显示雷电参数, 分析可能是附近的雷电定位系统发生故障, 未记录当时的雷电参数情况, 此外评估模型采用的是年均地闪密度, 与当日的地闪密度存在差异, 导致评估的风险等级较低。

(3) 模型所采用的数据是 2010 年的线路及雷击数据, 之后 3 年发生的 3 次雷击跳闸事故杆塔均属于 II 级及以上风险等级杆塔区段, 初步说明了该评估模型具有较好的预测功能及时效性。

3.3 线路评估

各大区域电网线路众多, 为了对比分析各线路之间防雷差异性以及防雷效果, 寻找出更为优异的防雷方法, 更好地指导线路防雷工作, 本文还对线路进行了评估。

线路各区段杆塔对线路整体的影响程度是不一样的, 为了反映这一差异性, 本文利用层次分析法确定各风险等级的权重系数, 并从杆塔区段到线路, 建立线路雷击风险评估方法。

层次分析法(AHP)是由美国运筹学家 T. L. Satty 等人提出的一种定性定量分析结合的综合决策方法。层次分析法有三种常用标度法: 九标度法、三标度法和指数标度。三标度法规则表清晰明了, 易于专家依据主观经验对决策目标进行两两判断, 其规则表如表 6。

表 6 三标度法规则表

Table 6 Rule table of the three-scale method

重要性指标	含义
2	表示两个指标相比, 前者比后者重要
1	表示两个指标相比, 具有同等重要性
0	表示两个指标相比, 前者比后者不重要

本小节评价的指标有 4 个, 即 I 级风险权重 α_1 、II 级风险权重 α_2 、III 级风险权重 α_3 、IV 级风险权重 α_4 。根据专家经验, 4 个指标的重要性程度排序为: $\alpha_1 > \alpha_2 > \alpha_3 > \alpha_4$ 。判断矩阵依据重要性累积程度并进行比例转换得到。

由表 7 可得比较矩阵为

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 2 & 2 \\ 0 & 1 & 2 & 2 \\ 0 & 0 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

表 7 评估指标重要性程度比较表

Table 7 Comparison table of evaluation index importance

	I 级风险	II 级风险	III 级风险	IV 级风险
I 级风险	1	2	2	2
II 级风险	0	1	2	2
III 级风险	0	0	1	2
IV 级风险	0	0	0	1

比较矩阵中最大的排序指数 r_{\max} 为 7, 行最小的排序指数 r_{\min} 为 1, 排序指数最大的指标 A_{\max} 是 I 级风险, 排序指数最小的指标 A_{\min} 是 IV 级风险。I 级风险对于 IV 级风险来说是十分重要的, 按照九级标度法给定 I 级风险与 IV 级风险相对重要程度为 7, 按照下面的交换式计算得到各评估指标间的相对重要性程度, 得到判断矩阵

$$\mathbf{B} = (b_{ij})_{n \times n} \quad (5)$$

其中

$$b_{ij} = \begin{cases} \frac{r_i - r_j}{r_{\max} - r_{\min}}(b_m - 1) + 1, & r_i \geq r_j \\ 1 / \left[\frac{r_i - r_j}{r_{\max} - r_{\min}}(b_m - 1) + 1 \right], & r_i < r_j \end{cases}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

由此得判断矩阵为

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 5 & 7 \\ \frac{1}{3} & 1 & 3 & 5 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 1 & 3 \\ \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

最大特征值为 $\lambda_{\max} = 4.117$, 对应的特征向量为 $\mathbf{x} = (0.888 \ 0, 0.412 \ 1, 0.184 \ 7, 0.086 \ 9)$ 。

检验判断矩阵的一致性如下

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{4.117 - 4}{4 - 1} = 0.039 \quad (8)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.039}{0.89} = 0.044 < 0.1 \quad (9)$$

即认为判断矩阵具有满意的一致性。

因此, 风险等级的权重系数 $\boldsymbol{\alpha} = \mathbf{x} = (0.888 \ 0, 0.412 \ 1, 0.184 \ 7, 0.086 \ 9)$ 。

同时由图 5 知, 各风险等级的比重 $\boldsymbol{\beta} = (1.81\%, 35.4\%, 35.66\%, 27.13\%)$, 故整条线路的雷击风险发生概率评估值为

$$P = \boldsymbol{\alpha} \cdot \boldsymbol{\beta}^T = 25.15\% \quad (10)$$

4 结论

针对现有的雷击风险评估方法的不足, 本文提出了“杆塔-杆塔区段-线路”差异化、多层次的雷击风险评估模型, 较为全面地考虑了杆塔雷击风险的各个影响因素, 以及杆塔和线路之间防雷效果的差异性, 从杆塔到杆塔区段, 再到线路, 分阶段评估雷击风险, 为线路易闪段的查找以及故障杆塔定位提供了可行的方法和手段。

参考文献

- [1] 罗日成, 李稳, 陆毅, 等. 基于 Hilbert-Huang 变换的 1000 kV 输电线路雷电绕击与反击识别方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 232-238.
LUO Richeng, LI Wen, LU Yi, et al. Identification method of shielding failure and back striking over-

voltage of 1 000 kV transmission line based on Hilbert-Huang Transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 232-238.

- [2] 束洪春, 曹璞璘, 杨竞及, 等. 考虑互感器传变特性的输电线路暂态保护雷击干扰与线路故障识别方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 1-12.
SHU Hongchun, CAO Pulin, YANG Jingji, et al. A method to distinguish between fault and lightning disturbance on transmission lines based on CVT secondary voltage and CT secondary current[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 1-12.
- [3] HU Min, HUANG Xuwei. Lightning activity analysis and risk evaluation of transmission line[C]// Proceedings of 2011 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering, June 17-19, 2011, Xi'an, China.
- [4] 詹花茂, 刘波, 颜廷利, 等. 操作冲击下空间电荷对间隙放电的影响[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 212-218.
ZHAN Huamao, LIU Bo, YAN Tingli, et al. Influence of space charge on air gap discharge under switching impulse[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 212-218.
- [5] 熊小伏, 王建, 袁峻, 等. 时空环境相依的电网故障模型及在电网可靠性评估中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 28-35.
XIONG Xiaofu, WANG Jian, YUAN Jun, et al. Temporal and spatial environments dependent power grid failure method and its application in power grid reliability assessment[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 28-35.
- [6] 金学成, 陈堂龙, 邹根华, 等. 自适应外部环境的电网安全稳定智能防御系统应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 137-142.
JIN Xuecheng, CHEN Tanglong, ZOU Genhua, et al. Application of power grid security and stability intelligent defense system self-adapting the external environment[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 137-142.
- [7] 郭乾晋, 周全, 黄义隆, 等. 高压直流典型线路雷击故障的控制保护响应研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(20): 140-145.
WU Qianjin, ZHOU Quan, HUANG Yilong, et al. Research of HVDC control and protection response for lightning stroke failures occurred in transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(20): 140-145.

- [8] SHINDO T, MATSUBARA H, SUDA T, et al. Development of a lightning risk assessment program (LIRAP)[J]. IEEE Transactions on Power and Energy, 2012, 132(8): 747-753.
- [9] 陈家宏, 冯万兴, 王海涛, 等. 雷电参数统计方法[J]. 高电压技术, 2007, 33(10): 6-10.
CHEN Jiahong, FENG Wanxing, WANG Haitao, et al. Statistical method of lightning parameters[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(10): 6-10.
- [10] 陈家宏, 王海涛, 冯万兴, 等. 1000 kV 线路走廊的雷电参数及易闪线段分析[J]. 高电压技术, 2006, 32(12): 45-48.
CHEN Jiahong, WANG Haitao, FENG Wanxing, et al. Analysis of lightning parameters and weak sections for 1000 kV UHV transmission line corridor[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(12): 45-48.
- [11] 陈家宏, 王剑, 童雪芳, 等. 电网雷害分布图研究[J]. 高电压技术, 2008, 34(10): 2016-2021.
CHEN Jiahong, WANG Jian, TONG Xuefang, et al. Research on power grid lightning hazard maps[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(10): 2016-2021.
- [12] DL/T620-1997 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S].
DL/T620-1997 over voltage protection and insulation coordination of AC electrical devices[S].
- [13] WANG Youyuan, YUAN Wen. Risk analysis method based on FMEA for transmission line in lightning hazards[J]. Sensors and Transducers, 2014, 171(5): 183-189.
- [14] 龚坚刚, 童杭伟. 基于雷电定位系统的浙江电网线路雷击跳闸率评估[J]. 华东电力, 2007, 35(1): 73-75.
GONG Jiangang, TONG Hangwei. Evaluation of lightning trip-out rates for Zhejiang Power Grid by using lightning location systems[J]. East China Electric Power, 2007, 35(1): 73-75.
- [15] LU Yongling, LIU Yang, ZHOU Zhicheng, et al. Lightning risk assessment method of transmission line using distributed traveling wave monitoring[C] // 2014 International Conference on Lightning Protection, December 3, 2014, Shanghai, China.
- [16] 马钦国, 米凯, 石磊, 等. 750 kV 输电线路防雷保护措施的研究[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(12): 66-71.
MA Qinguo, MI Kai, SHI Lei, et al. Research on lightning protection in 750 kV transmission lines[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(12): 66-71.
- [17] 黄文武, 肖明杰, 杨旭, 等. 输电线路雷击闪络分析中杆塔模型的研究[J]. 高压电器, 2015, 51(6): 166-172.
HUANG Wenwu, XIAO Mingjie, YANG Xu, et al. Research on transmission tower models for lightning flashover analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(6): 166-172.
- [18] 刘勇. 区域输电网雷击闪络风险评估技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
LIU Yong. The research on lightning flashover risk assessment of regional transmission grid[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.
- [19] 张金霞. 输电线路雷击跳闸率的简易计算法[J]. 电气技术, 2007(5): 46-50.
ZHANG Jinxia. A simple calculation method of lightning trip-out rates for transmission line[J]. Electrical Engineering, 2007(5): 46-50.
- [20] SUZUKI M, KATAGIRI N, ISHIKAWA K. Establishment of estimation lightning density method with lightning location system[C] // Power Engineering Society 1999 Winter Meeting, IEEE, New York, 1999(2): 1322-1326.
- [21] 李瑞芳. 雷电活动及地形地貌对输电线路绕击特性的影响研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
LI Ruifang. The study on effects of lightning activity and terrain on transmission lines shielding failure characteristics[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.

收稿日期: 2015-05-10; 修回日期: 2015-10-20

作者简介:

邓红雷(1975-), 男, 博士, 副教授, 主要从事电力设备在线监控与故障诊断的研究; E-mail: denghl@scut.edu.cn

李述文(1990-), 男, 硕士研究生, 主要从事输变电设备在线监控系统的研究;

戴 栋(1976-), 男, 博士, 教授, 研究方向为智能输变电关键技术、气体放电、非线性电路与系统等。

(编辑 葛艳娜)