

输电线路差异化防雷评估

新疆地形地貌呈现多样性，全区部分地区夏季雷电活动较频繁。随着新疆特高压建设工程的不断推进，电网的雷电监测与防护要求也日益提高。输电线路差异化防雷将影响线路耐雷水平的雷电信息、地形地貌参数及线路基本信息多方面自然影响因子科学融合，形成可准确筛选潜在高风险杆塔并制定高经济性改造方案的线路雷害防御技术。着重以雷电参数统计建立雷击杆塔跳闸率模型，通过指标判断杆塔防雷性能。采用先评估、后治理、再总结的方式，对输电线路进行可靠性评估。

马建功 刘 刚 张小军 李晓光 董新胜/新疆电力科学研究院

0 引言

输电线路差异化防雷评估系统是以差异化评估技术为基础，分为杆塔数据输入、线路展示、雷电活动参数统计分析、跳闸率计算及改造方案制定六部分。本文考虑输电线路防雷的实际情况，如雷电活动分布、雷击输电线路故障、地形特征及微气候特征参数等差异性，采取合适的可靠性分析方法，实现差异化防雷可靠性评估。主要分为四个部分：

1) 基础数据采集。它包括雷电参数和输电线路数据。雷电参数通过雷电定位系统测定地闪数据，统计多年的雷电参数可推导出雷电概率分布；线路数据包括杆塔和线路结构参数、输电线路廊道地形特征。

2) 建立合适的雷击线路模型。采用数理统计方法，通过大量重复的仿真运算得到每基杆塔雷击跳闸率。

3) 建立合适的评估标准。根据评估标准划分各基杆塔的风险等级，评估其防雷性能强弱。

4) 防雷改造措施。对于防雷性能弱的杆塔，考虑杆塔所在地雷电情况、地形地貌、杆塔结构和绝缘情况，确定经济合理的改造方案。

本文主要对雷电参数采集、计算模型和评估指标进行理论分析，并结合新疆锦昌一线输电线路进行评估。

1 雷电参数统计

1.1 地闪密度分布

地闪是指云体与大地形成电极，两侧电位差强度足以击穿空气，形成地闪^[1]。由定义可知，地闪分正地闪和负地闪。负地闪较正地闪频繁，负地闪是云内负电荷输送到地面的负极性放电。每年每平方公里发生的地闪次数为地闪密度。雷电定位系统获得地闪的空间和时间数据，它是地闪密度最客观的统计资料。

区域地闪密度是将雷电活动分布进一步划分，将某地区划分成面积相近的地块，计算每一地块的地闪密度，将各个地块的地闪密度累加，组成该地区的区域地闪密度^[2]。

对于某一条输电线路，将该线路所在区域按照经纬度方向划分为 n 个相等的网格，得到面积为 $S_1, S_2, \dots, S_n$ ，总面积为 $S_a = S_1 + S_2 + \dots + S_n$ ，该面积对应的地闪次数记为 $N_1, N_2, \dots, N_n, N_1 + N_2 + \dots + N_n = N_a$ ，则地闪密度的平均值 N_g 可表示为

$$N_g = \frac{\sum_{i=1}^n N_{gi} S_i}{\sum_{i=1}^n S_i} = \frac{\sum_{i=1}^n N_i}{\sum_{i=1}^n S_i} = \frac{N_a}{S_a} \quad (1)$$



马建功/工程师

关键词/Keywords

雷电定位 ·
输电线路 ·
防雷 ·
可靠性评估 ·

将输电线路划分网格后形成多边形边界,单位区域网格偏大,增大等效区域面积,导致误差增大;选择网格偏小,不仅增加统计计算量,还会增大统计值的离散性。经研究发现,合适的单位区域网格为 $0.04^{\circ} \times 0.04^{\circ} \sim 0.2^{\circ} \times 0.2^{\circ}$,网格划分如图1所示。

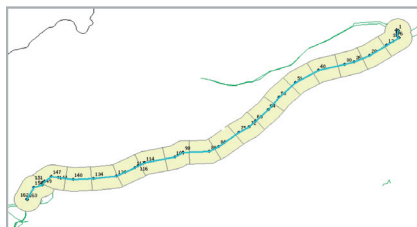


图1 线路走廊网格法划分示意图

依据电力行业标准《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》规定^[3],线路等效受雷宽度为

$$W = b + 4h_g \quad (2)$$

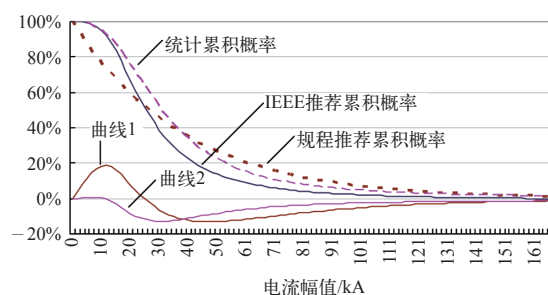
式中, b 为避雷线平均宽度; h_g 为避雷线对地平均高度,对于220 kV及以下电压等级的输电线路,杆塔高度一般小于100 m,避雷线宽度与6 m,线路廊道各取1 km,雷电定位系统一般存在1 km定位误差,因此,对于220 kV及以下的输电线路,受雷宽度取4 km。

1.2 雷电流幅值概率分布

雷电流参数包括幅值、极性和发生时间等,通过多年研究,规程法给出雷电流幅值的概率分布表达式为 $\lg P_1 = -I/88$ 。由于该公式只含有变量 I ,对全国各地区的雷电流幅值概率分布多样性表述过于笼统,因此,本文引用文献[2]关于雷电流幅值的表示法,引入参变量 a 、 b ,更好地描述某一地区雷电流幅值概率分布情况,其表达式为

$$P_{>I} = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{a}\right)^b} \quad (3)$$

为验证式(3)的准确性,将IEEE推荐的雷电流幅值概率分布公式和规程法公式与其进行对比。图2为某省雷电流幅值概率分布曲线,从整体上看,式(3)介于IEEE概率分布和规程法概率分布之间,在雷电流小于20 kA时与IEEE曲线接近;



注:曲线1—统计雷电流幅值累积概率与规程法概率之差;
曲线2—统计雷电流幅值累积概率与IEEE推荐概率之差。

图2 雷电流幅值累积概率曲线比较

在雷电流大于35 kA时,式(3)与规程法更接近。

2 跳闸率

2.1 绕击跳闸率

雷电绕击是指雷电流绕过避雷线或地线直接击中导线,绕击与输电线路的几何模型有关。将雷电流特性与线路结构尺寸联系起来,建立绕击跳闸率数学模型。事实上,雷电先导在对地发展过程中,在避雷线、导线以及大地上都会感应出异性电荷,感应电荷与各自的形状有关,为了简化计算,现在假设:①在雷电先导到达一级定位点之前,雷电放电路径垂直下行;②不考虑下行先导电荷外的其他电荷对空间电场的影响;③不考虑避雷线跟导线之间产生的感应电荷影响。

在理想情况下,地面倾角 $\theta = 0^{\circ}$ 。如图3a所示。图中, h_s 为避雷线高度; h_c 为导线高度; r_s 为避雷线击距; r_c 为导线击距; r_g 为地面击距; r_s 与 r_c 相等。在输电线路截面上划分为三个部分,即图3a中的 $\widehat{BC}$ 弧段、 $\widehat{AB}$ 弧段和 AD 直线段。其中,弧 $\widehat{BC}$ 为避雷线屏蔽弧,以避雷线为圆心、 r_s 为半径的圆弧段;弧 $\widehat{AB}$ 为导线暴露弧,以导线为圆心、 r_c 为半径的圆弧段;直线 AD 是离地面高度为 r_g 且与地面平行的直线。当雷电先导定位于弧段 $\widehat{BC}$ 范围内,先导会击中避雷线;当先导定位于弧段 $\widehat{AB}$,先导必击中导线;若先导定位于 AD ,则先导必击中地面。

雷电流 I 与 r_s 、 r_c 和 r_g 为正相关,即当雷电流增大时, r_s 、 r_c 和 r_g 都将增大,弧段 $\widehat{AB}$ 逐渐减小直至点 A 和点 B 交于一点,如图3b所示,定义此时的雷

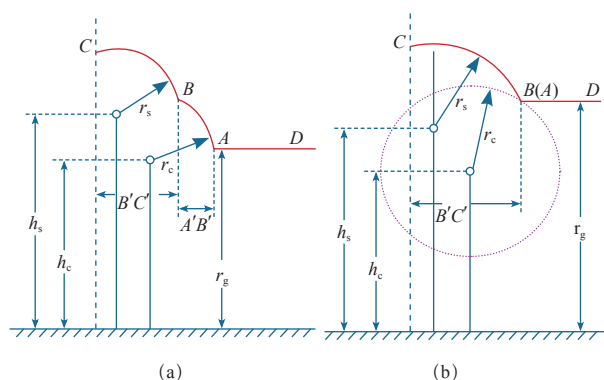


图3 绕击跳闸率线路模型

电流为 I_{sm} 。当 $I > I_{sm}$ 时，导线 r_c 将被避雷线 r_s 和地面 r_g 完全屏蔽，雷电先导直接击中导线的概率为零。

雷电流 I 与避雷线 r_s 的函数关系为

$$r_s = 10I^{0.65} \quad (4)$$

采用IEEE 1243—1997给出雷电对大地的击距表达式为

$$r_g = \begin{cases} [0.36 + 0.17 \ln(43 - h_c)] I^{0.65} \\ 4.5 I^{0.65} \end{cases} \quad (5)$$

式中， h_c 为导线的平均高度。

雷直击导线后，导线耐雷水平与线路绝缘子串雷电冲击放电电压 $U_{50\%}$ 、导线波阻抗、导线的工作电压和雷电通道波阻抗呈函数关系，工程计算时导线波阻抗可忽略不计，线路的绕击耐雷水平表达式为

$$I_{sc} = \frac{2(U_{50\%} - U_n)}{Z_c} \quad (6)$$

最大绕击电流表达式为

$$I_{sm} = \left[k(h_c + h_g) + \sin(\alpha + \theta) \cdot \sqrt{(h_c + h_g)^2 - G} \right] \cos \theta / 2F \quad (7)$$

$$F = k^2 - \sin^2(\alpha + \theta) \quad (8)$$

$$G = F[(h_s - h_c) / \cos \alpha \cos \theta]^2 \quad (9)$$

式中， θ 为地面倾角，rad； α 为避雷线保护角，rad； h_s 为避雷线平均高度，m； k 为击距系数。

对于给定的输电线路，地面倾角 θ 已知，式(7)为保护角 α 的单值函数，求出最大绕击电流 I_{sm} 。

绕击跳闸率可表示为

$$P_r = \frac{2N_g}{10} \int_{I_{sc}}^{I_{sm}} \dot{P}(I) D_c(I) dI \quad (10)$$

式中， N_g 为地闪密度，次/ $\text{km}^2 \cdot \text{a}$ ； I_{sc} 为绕击耐雷水

平，kA； I_{sm} 为最大绕击电流，kA； $\dot{P}(I)$ 为雷电流幅值概率密度，是雷电流幅值概率分布函数 $P(I)$ 的导数^[4]。

2.2 反击跳闸率

反击跳闸率采用规程法计算，将杆塔视为等效感抗，避雷线分支作为等效电抗。当雷击杆塔时，由于杆塔电阻小，雷电流主要沿着被击杆塔流入大地，剩余的小部分雷电流经过避雷线支路流入大地，等效电路如图4所示。

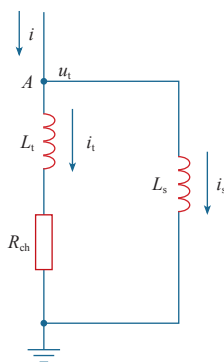


图4 雷击杆塔的等效电路

根据上述等效电路图： $i_t = \beta i$ ，其中 β 为杆塔分流系数，即杆塔电流与雷电流的比值。塔顶电位计算如下

$$u_t = R_{ch} i_t + L_t \frac{di_t}{dt} = \beta \left(R_{ch} i + L_t \frac{di}{dt} \right) \quad (11)$$

式中， R_{ch} 为杆塔的冲击接地电阻； L_t 为杆塔的等效电感。

杆塔波阻抗和电感值如表1所示，对于一般长度的档距，分流系数 β 如表2所示。

表1 杆塔波阻抗和电感平均值

杆塔型式	波阻抗/ Ω	杆塔电感/($\mu\text{H}/\text{m}$)
无拉线钢筋混凝土单杆	250	0.84
有拉线钢筋混凝土单杆	125	0.42
无拉线钢筋混凝土双杆	125	0.42
铁塔	150	0.50
门型铁塔	125	0.42

当雷击杆塔塔顶时，杆塔上雷电流使其空间磁场突然变化，在导线上产生反向的感应雷电压，幅值为 $a(1-k)h_c$ ，其中 h_c 为导线对地的平均高度， a 为感应过电压系数， k 为耦合系数。所以导

表2 一般长度档距的线路杆塔分流系数 β

额定电压/kV	避雷线根数	β
110	单避雷线	0.99
	双避雷线	0.86
220	单避雷线	0.92
	双避雷线	0.88
330	双避雷线	0.88

线电压为杆塔和导线的耦合电压与感应雷电压之差, 耦合电压为 ku_t , $\tau_f = 4.6 \mu s$ 。被击杆塔导线电压表达式为

$$u_c = ku_t - ah_c(1-k)\frac{t}{\tau_f} \quad (12)$$

反击主要考察绝缘子串的耐压能力，即塔顶电位与导线电位之差，即

$$u_{\text{int}} = u_{\text{t}} - u_{\text{c}} = (1-k) \left[\beta \left(R_{\text{ch}} i + L_{\text{t}} \frac{di}{dt} \right) + a h_{\text{c}} \frac{t}{\tau_{\text{f}}} \right] \quad (13)$$

式中, u_{int} 为绝缘子串的电压。

由 $u_{\text{int}} \leq U_{50\%}$ 即可求出杆塔的反击耐雷水平,即

$$I_f = \frac{U_{50\%}}{(1-k)\beta R_{ch} + \left(\frac{h_a}{h_t} - k\right)\beta \frac{L_t}{2.6} + \left(1 - \frac{h_g}{h_c} k_0\right) \frac{L_t}{2.6}} \quad (14)$$

反击跳闸率的计算表达式为

$$P_f = \gamma T_d (b + 4h_g) g \eta P_I \quad (15)$$

式中, γ 为地闪密度, 次/($\text{km}^2 \cdot \text{a}$); T_d 为雷电日; b 为避雷线水平距离, m; h_g 为避雷线平均高度, m; g 为杆塔的击杆率; η 为建弧率; P_I 为雷电流幅值概率。

建弧率的表达式为

$$\eta = (3.5E^{0.75} - 14) \times 10^{-2} \quad (16)$$

式中, E 为绝缘子串的平均运行电压梯度, kV/m 。

$$E = \frac{U_n}{\sqrt{3}I} \quad (17)$$

当 $E \leq 6 \text{ kV/m}$, 建弧率接近于0。

击杆率 g 的数据获取如表3所示。

表3 击杆率

避雷线根数	1	2
平原	1/4	1/6
山丘	1/3	1/4

3 防雷参考指标

3.1 地闪密度等级

根据危险程度将地闪密度划分不同的风险等级，按照地闪密度值分为四个等级、七个层级，如表4所示。

表4 地闪密度风险等级

风险等级	地闪密度范围
A级	$N_g < 0.78 \text{ 次}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$
B1级	$0.78 \text{ 次}/(\text{km}^2 \cdot \text{a}) \leq N_g < 2.0 \text{ 次}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$
B2级	$2.0 \text{ 次}/(\text{km}^2 \cdot \text{a}) \leq N_g < 2.78 \text{ 次}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$
C1级	$2.0 \text{ 次}/(\text{km}^2 \cdot \text{a}) \leq N_g < 2.78 \text{ 次}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$
C2级	$3.0 \text{ 次}/(\text{km}^2 \cdot \text{a}) \leq N_g < 7.98 \text{ 次}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$
D1级	$7.98 \text{ 次}/(\text{km}^2 \cdot \text{a}) \leq N_g < 11.0 \text{ 次}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$
D2级	$N_g \geq 11.0 \text{ 次}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$

A、B、C和D风险等级由弱到强。其中，A级为少雷区，平均年雷暴日数不超过15；B1级和B2级为中雷区，平均年雷暴日数超过15，但不超过40；C1级和C2级为多雷区，平均年雷暴日数超过40，但不超过90；D1级和D2级为强雷区，平均年雷暴日数超过90。

3.2 雷害风险分布等级

根据《110(66)~500 kV架空输电线路管理规范》，雷击跳闸率分为绕击跳闸率和反击跳闸率，分别划分A、B、C和D四个风险等级。对于某一输电线路，风险控制指标需参考线路的实际运行经验等因素确定。风险评估等级划分指标如表5所示。

P_r 为计算的绕击跳闸率, P_f 为反击跳闸率; S_r

表5 雷击跳闸风险等级划分指标

绕击跳闸率 等级	$P_i < S_i \times 0.5$ $[0, S_i \times 0.5)$	$S_i \times 0.5 \leq P_i < S_i \times 1.0$ $[S_i \times 0.5, S_i \times 1.0)$	$S_i \times 1.0 \leq P_i < S_i \times 1.5$ $[S_i \times 1.0, S_i \times 1.5)$	$P_i \geq S_i \times 1.5$ $[S_i \times 1.5, \infty)$
反击跳闸率 等级	$P_i < S_i \times 0.5$ $[0, S_i \times 0.5)$	$S_i \times 0.5 \leq P_i < S_i \times 1.0$ $[S_i \times 0.5, S_i \times 1.0)$	$S_i \times 1.0 \leq P_i < S_i \times 1.5$ $[S_i \times 1.0, S_i \times 1.5)$	$P_i \geq S_i \times 1.5$ $[S_i \times 1.5, \infty)$
跳闸率 等级	$P < (S_i + S_j) \times 0.5$	$(S_i + S_j) \times 0.5 \leq P < (S_i + S_j) \times 1.0$	$(S_i + S_j) \times 1.0 \leq P < (S_i + S_j) \times 1.5$	$P \geq (S_i + S_j) \times 1.5$

为绕击风险控制指标, S_r 为反击风险控制指标。 S_r = 雷击跳闸率(40个雷暴日) × 运行经验中绕击所占比例, S_f = 雷击跳闸率(40个雷暴日) × 运行经验中反击所占比例。

4 建模仿真

4.1 输电线路参数

(1) 线路基本概况

220 kV锦昌一线1808线路由昌吉管辖, 管段全长6.20 km, 投运于2014年3月, 本文取11#~27#为建模样本, 共17基杆塔, 单回架设线路, 全线除安装两条避雷线外, 无其他防雷措施。

(2) 雷击信息统计

据当前资料统计, 线路运行至今共发生两次跳闸故障。雷击信息统计如表6所示。

《110(66)~500 kV架空输电线管理规范》中线路的雷击跳闸率(归算到40个雷暴日, 2.78 次/

表6 雷击故障信息统计

杆塔号	故障时间	接地电阻/ Ω	是否安装防雷措施
12	2014/7/15 16: 02	2.31	是
17	2014/8/28 3: 27	4.58	是

($\text{km}^2 \cdot \text{a}$)), 锦昌一线1808线应达到如下指标: 220 kV, 跳闸率为0.315 次/($\text{km}^2 \cdot \text{a}$); 1808线平均年地闪密度为4.961 次/($\text{km}^2 \cdot \text{a}$)。由运行经验可知, 绕击闪络对于该线路的正常运行影响更大, 在雷击闪络风险评估时, 绕击跳闸率指标取总跳闸率指标的71.6%, 反击跳闸率指标取28.4%, 因此将1808线绕击跳闸率指标值定为0.225 5 次/($\text{km}^2 \cdot \text{a}$), 反击跳闸率指标值定为0.089 5 次/($\text{km}^2 \cdot \text{a}$)。

4.2 雷电风险评估结果

杆塔雷击闪络风险划分为A、B、C、D四个等级, 该划分方法可以将各基杆塔防雷性能的相对强弱更为直观地表示出来。1808线11#~20#杆塔雷击闪络风险等级评估结果如表7所示。

表7 1808线11#~20#杆塔雷击闪络风险等级评估结果

编号	塔型	反击跳闸率	等级	绕击跳闸率	等级	雷击跳闸率	等级
11	SJT3	0.053 6	B	0.005 1	A	0.058 7	A
12	SDJ1	0.047 9	B	0.004	A	0.051 9	A
13	SZT1	0.239 6	A	0.005 1	A	0.244 7	B
14	SJT1	0.056 3	B	0.005 7	A	0.062	A
15	SZTS4	0.025 4	A	0.004 3	A	0.029 7	A
16	SZK2	0.153 1	D	0.732 6	D	0.885 7	D
17	SZK2	0.069 9	B	0.843	D	0.912 9	D
18	SJTS1	0.317 9	D	0.167 3	B	0.485 2	D
19	SJTS2	0.077 7	B	0.009 2	A	0.086 9	A
20	JTS1	0.073 5	B	1.205 8	D	1.279 3	D

(1) 绕击风险评估

杆塔绕击跳闸率计算结果如图5所示。如图6所示, A、B、C和D各类风险等级杆塔数量分别为9基、3基、0基和5基, 比例分别为52.9%、17.65%、0和29.41%, 有29.41%杆塔防雷性能不理想, 绕击闪络风险等级偏高, 杆塔号为16#、17#、20#、25#和27#; 70.59%的其余杆塔具有较好的绕击防雷性能。

(2) 反击风险评估

杆塔反击跳闸率计算结果如图7所示。如图8

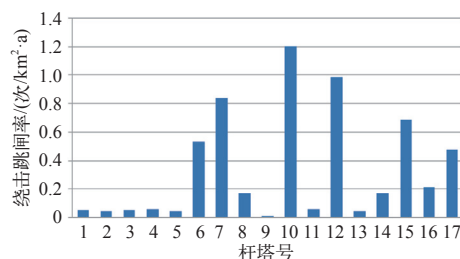


图5 杆塔绕击跳闸率计算结果

所示, A、B、C和D各类风险等级杆塔数量分别为3基、7基、2基和5基, 比例分别为17.65%、41.18%、11.76%和29.41%, 有41.17%杆塔防雷性

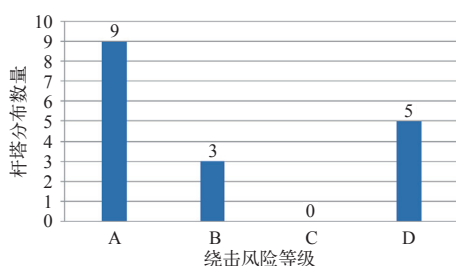


图6 绕击风险等级的杆塔数量分布图

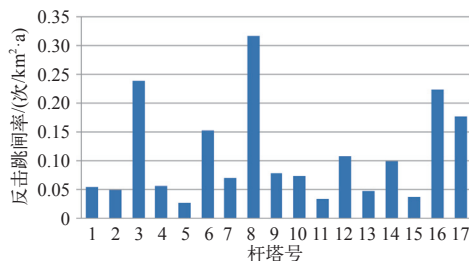


图7 杆塔反击跳闸率计算结果

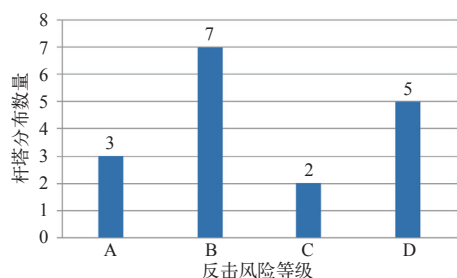


图8 反击风险等级的杆塔数量分布图

能不理想，绕击闪络风险等级偏高，等级C的杆塔号为12[#]和14[#]，风险等级D的杆塔号为13[#]、16[#]、18[#]、26[#]和27[#]；58.83%的其余杆塔具有较好的绕击防雷性能。

(3) 风险评估结果

杆塔雷击跳闸率计算结果如图9所示。如图10所示，A、B、C和D各类风险等级杆塔数量分别为7基、3基、1基和6基，比例分别为41.18%、17.65%、5.88%和35.29%，有41.17%杆塔防雷性能不理想，绕击闪络风险等级偏高，等级C的杆塔

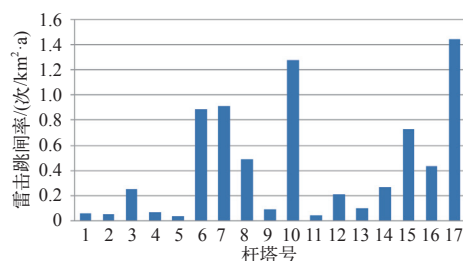


图9 杆塔雷击跳闸率计算结果

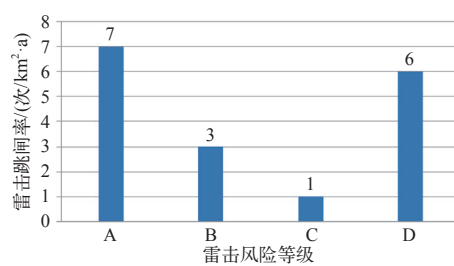


图10 不同雷击风险等级的杆塔数量分布图

号为26[#]，风险等级D的杆塔号为16[#]、17[#]、18[#]、25[#]和27[#]；58.83%的其余杆塔具有较好的绕击防雷性能。

5 结束语

根据该线路已有的雷击跳闸记录，结合影响雷击跳闸的线路特征、地形地貌等因素，确定需要进行防雷改造杆塔的范围和防雷措施为：

- 1) 评估为C和D级的需要改造，反击以降阻为主、绕击以避雷器为主。
- 2) 耐张且接地电阻超过30 Ω或山顶的杆塔安装线路避雷器。
- 3) 地貌为山顶且杆塔高度大于40 m的杆塔安装线路避雷器。
- 4) 接地电阻超过40 Ω的杆塔降低接地电阻。

参考文献

- [1] 陈家宏，等．雷电参数统计方法 [J]．高电压技术 2007，33 (10)．
- [2] 童雪芳，等．雷电定位系统地闪密度分布图与雷击故障相关性分析 [J]．高电压技术，2009，35 (12)：2924-2929．
- [3] 杜澍春．交流750 kV单回线路杆塔空气间隙的研究 [J]．电网技术，2008，32 (19)：1-4．
- [4] 李燕．500 kV蝶沧甲乙线杆塔参数对雷击跳闸率的影响分析 [D]．广州：华南理工大学，2014．
- [5] 张浩，等．同塔多回输电线路差异化防雷措施研究及防雷改造 [J]．电力与能源，2014，35 (6)：724-728．
- [6] 赵淳，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．

(收稿日期：2017-05-19) EA