

基于修正击距曲线交点坐标的绕击跳闸率研究

分析了传统电气几何模型采用击距曲线交点的水平投影来计算绕击跳闸率存在的问题,提出了基于修正击距曲线交点的坐标来改进模型。通过改进前后模型的对比,分析了地面倾角、保护角和呼称高度等因素对500 kV输电线路绕击跳闸率的影响,并解释了其产生的原因。应用改进模型分析了雷电参数和绕击率的关系。结果表明:在地面倾角较大的山区地带,通过修正击距曲线交点坐标的方法可提高绕击跳闸率计算准确度;在保护角较小时,合理降低呼称高度,绕击跳闸率降低效果更明显。在绕击跳闸事故中,雷电倾斜击中导线比竖直击中导线可能性大。

刘超智 周羽生 周 顺 刘诗涵 陈 辉/长沙理工大学电气与信息工程学院

0 引言

国内外超/特高压电网雷击事故统计表明,雷电绕击输电导线是造成雷击跳闸的主要原因^[1-5]。在500 kV输电线路防雷性能优劣的各项评估指标中,绕击跳闸率是主要参考指标^[6]。因此,准确计算绕击跳闸率,不仅能使输电线路防雷性能评估结果更可靠,还能及时发现输电线路中的防雷薄弱点,从而采取有针对性的措施来提高防雷性能。

为准确计算绕击跳闸率,人们对影响跳闸率的各项因素作了大量的统计和理论研究,其中得到广泛认可的方法主要有规程法、先导模型法和电气几何模型法(Electro-Geometric Model, EGM)^[7-9]。规程法常用于矮杆塔、低压线路;先导模型法在计算绕击跳闸率

时,一些关键参数并未得到统一,且不同参数下计算结果差异大;EGM综合考虑了雷电的放电特性、线路的结构以及线路经过地区的地形地貌和气候等因素对绕击跳闸率的影响^[10]。其基本原理^[11]是:①雷电先导先到达地面上某物体的击距曲线之内,则认为雷电击中该物体;②击距大小与雷电流幅值有关。

传统EGM在计算不同雷电流、不同入射角下的绕击率时,直接采用击距曲线交点的水平投影来计算,使用该方法的缺点是保护弧和暴露弧的投影长度会不同程度地减少,因而计算结果与实际值可能存在偏差^[12-13]。为使击距曲线交点的投影准确反映保护弧和暴露弧的投影,提高计算准确度,本文根据击距曲线交点的投影是否为保护弧和暴露弧投影的端点对其进行修正。由平行线分线段成比例定理可知,保护弧和暴露弧水平投影之比等于保护弧和暴露弧正投影之比。在计算不同雷电流、不同入射角下的绕击率时,通过坐标的旋转变换可得到正投影长度即为修正后击距曲线交点横坐标之差,绕击率即为暴露弧正投影长度和总正投影长度的比值,从而有效提高了绕击跳闸率计算结果的准确度。

1 传统EGM及存在的问题

1.1 传统EGM

传统EGM如图1所示。图中, H_w 和 H_s 分别为导线和避雷线对地的平均高度; s 为最外侧导线与避雷线之间的直线距



刘超智/硕士研究生

关键词/Keywords

电气几何模型(EGM) ·
绕击跳闸率 ·
击距 ·
保护角 ·

国家自然科学基金(51407013),湖南省高等学校
创新平台基金资助项目(14K001)。

离； θ 为地面倾角； x_B 为导线所在横担长度； l_{HF} 为暴露弧 $\widehat{HF}$ 在水平面上的投影长度； l_{FG} 为暴露弧 $\widehat{FG}$ 在水平面上的投影长度； r_c 、 r 和 r_s 分别为导线击距、地面击距和避雷线击距。

绕击率的计算式为

$$p = \frac{l_{FG}}{l_{HF} + l_{FG}} = \frac{r_c (\cos \theta_1 - \cos \theta_2)}{r_c \cos \theta_1 + x_B} \quad (1)$$

其中

$$\begin{cases} \theta_1 = \arcsin \left(\frac{r - H_c \cos \theta}{r_c} \right) \\ \theta_2 = \frac{\pi}{2} + \alpha + \theta - \arccos \left(\frac{r_c^2 + s^2 - r_s^2}{2sr_c} \right) \end{cases} \quad (2)$$

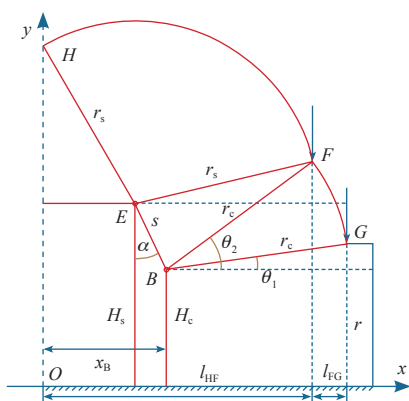


图1 传统EGM

当 $\theta_1 = \theta_2$ 时，交点 F 和交点 G 重合，导线击距曲线恰好全部在避雷线击距曲线之内，即认为雷电不再绕击导线，求出此时的电流即为最大绕击电流 $I_{\max}$ 。于是绕击跳闸率 n 计算式为

$$n = 2N\eta \int_{I_0}^{I_{\max}} pf(I) dI \quad (3)$$

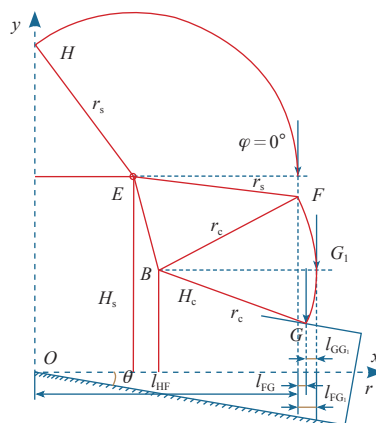
式中， I_0 、 N 和 η 分别为耐雷水平、落雷次数和建弧率； $f(I)$ 为雷电流概率密度函数。

1.2 传统EGM存在的问题

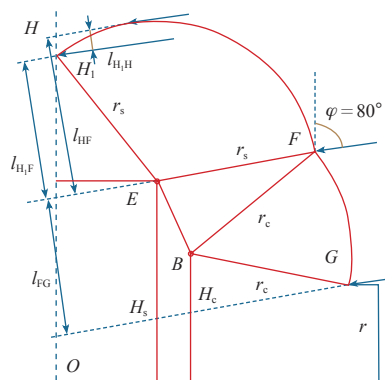
传统EGM在计算绕击率时，直接采用击距曲线的交点在水平面上的投影计算绕击率。当地面倾角较大而雷电流不大时，雷电对地面的击距较小，暴露弧和地面保护弧的交点 G 就可能低于点 B ，EGM如图2a所示。雷电垂直击中导线概率的计算式为

$$p_1 = \frac{l_{FG_1}}{l_{HF} + l_{FG_1}} \quad (4)$$

通过比较可知： $p_1 > p$ ，即传统EGM绕击率计算值偏小，从图2a中也可看出传统EGM忽略了暴露弧 l_{GG_1} ，故在此种情况下绕击率计算值偏小。



(a) 当地面倾角较大而雷电流不大时



(b) 当雷电入射角较大时

图2 地面倾角、雷电入射角对传统EGM的影响

对于500 kV及以上电压等级线路，避雷线横担一般较长，当雷电入射角较大时，EGM如图2b所示。由平行线分线段成比例定理可知，保护弧和暴露弧的水平投影之比等于其正投影之比，故可用正投影来简化计算。雷电以该入射角击中导线的概率计算式为

$$p_2 = \frac{l_{FG}}{l_{H_1F} + l_{FG}} \quad (5)$$

通过比较可知： $p_2 < p$ ，即传统EGM绕击率计算值偏大，从图2b中也可看出传统EGM忽略了保护弧投影 l_{H_1H} ，故在此种情况下计算结果偏大。

传统EGM在考虑雷电入射角时，认为绕击右

回线路其取值范围是 $[0, \pi/2]$ ，绕击左回线路其取值范围是 $[-\pi/2, 0]$ 。然而，当保护角较大时，EGM如图3所示，此时两回线路均有可能发生绕击。因此，在保护角较大时，应用传统EGM绕击率计算结果会偏小。

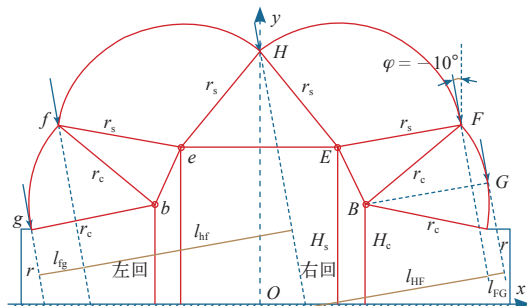


图3 保护角对传统EGM的影响

2 改进EGM

2.1 坐标系的建立

在传统EGM的分析基础上，以塔底中心为坐标原点，水平向右为 x 轴正方向，竖直向上为 y 轴正方向，建立坐标系如图4所示。设 O 点坐标为 $(0,0)$ ， E 点坐标为 (x_E, y_E) ， B 点坐标为 (x_B, y_B) ； x_E 和 x_B 分别为避雷线和导线所在横担长度； y_E 和 y_B 分别为避雷线和导线的平均高度。以 E 点为圆心、 r_s 为半径的避雷线击距曲线方程为

$$(x-x_E)^2 + (y-y_E)^2 = r_s^2 \quad (6)$$

输电导线的击距曲线方程为

$$(x-x_B)^2 + (y-y_B)^2 = 0 \quad (7)$$

在地面倾角为 θ 时，地面的击距曲线方程为

$$x \tan \theta + y - r(\cos \theta)^{-1} = 0 \quad (8)$$

由于不同雷电入射角下保护弧和暴露弧的投影与端点和圆心的位置有关，为了准确计算其投影和绕击率，对其进行坐标旋转变换。当雷电入射角为 φ 时，将 $x-y$ 顺时针旋转 φ 得到 $x'-y'$ ，见图4，弧的投影长度便可直接用端点的横坐标之差来表示，进而简化了计算。

变换前后坐标关系为

$$\begin{cases} x' = x \cos \varphi - y \sin \varphi \\ y' = x \sin \varphi + y \cos \varphi \end{cases} \quad (9)$$

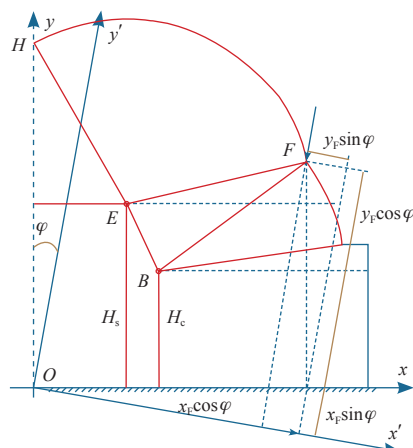


图4 改进EGM的坐标关系

2.2 击距曲线交点坐标的修正

2.2.1 交点H的修正

交点 H 为暴露弧与 y 轴的交点，结合式(6)可解得交点 H 的坐标为

$$\begin{cases} x_H = 0 \\ y_H = \sqrt{r_s^2 - x_E^2} + y_E \end{cases} \quad (10)$$

当雷电入射角 φ 满足不等式(11)或在区间 $[-\pi/2, 0]$ 时，保护弧投影的左端点为交点 H 投影，此时用交点 H 计算绕击率准确，故无须修正。

$$\tan\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) = k_\varphi > k_H = \frac{x_E - x_H}{y_E - y_H} \quad (11)$$

雷电入射角 φ 不满足不等式(11)且不在区间 $[-\pi/2, 0]$ 时，见图2b，保护弧投影的左端点是斜率为 k_φ 的直线与保护弧的切点投影，因此应将交点 H 的点坐标修正为

$$\begin{cases} x_H = x_E - \frac{k_\varphi r_s}{\sqrt{k_\varphi^2 + 1}} \\ y_H = y_E + \frac{r_s}{\sqrt{k_\varphi^2 + 1}} \end{cases} \quad (12)$$

2.2.2 交点F的修正

当 $(y_F - y_E) \cos \varphi > (x_E - x_F) \sin \varphi$ ，即在雷电入射角为 φ 时，通过式(9)坐标变换后，避雷线击距曲线与导线击距曲线交点 F 的纵坐标大于点 E 的纵坐标，如图1中 E 、 F 点的关系。此时，保护弧投影的右端点为交点 F 的投影，联立式(6)、式(7)，可解得交点 F 的坐标为

$$\begin{cases} x_F = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \\ y_F = y_E + T + \frac{x_E - x_B}{y_B - y_E} x_F \end{cases} \quad (13)$$

其中

$$\begin{cases} T = \frac{r_s^2 - r_c^2 + x_B^2 - x_E^2 + (y_B - y_E)^2}{2(y_B - y_E)} \\ A = 1 + \left(\frac{x_E - x_B}{y_B - y_E} \right)^2 \\ B = 2 \left(\frac{x_E - x_B}{y_B - y_E} T - x_E \right) \\ C = x_E^2 + T^2 - r_s^2 \end{cases} \quad (14)$$

当 $(y_F - y_E)\cos\varphi \leq (x_E - x_F)\sin\varphi$, 即在雷电入射角为 φ 时, 通过式(9)坐标变换后, 交点 F 的纵坐标不大于点 E 的纵坐标。保护弧投影的右端点是斜率为 k_φ 的直线与保护弧切点的投影, 因此应将交点 F 的坐标修正为

$$\begin{cases} x_F = x_E + \frac{|k_\varphi| r_s}{\sqrt{k_\varphi^2 + 1}} \\ y_F = \begin{cases} y_E + \frac{r_s}{\sqrt{k_\varphi^2 + 1}} & \varphi \in \left[-\frac{\pi}{2}, 0\right] \\ y_E - \frac{r_s}{\sqrt{k_\varphi^2 + 1}} & \varphi \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right] \end{cases} \end{cases} \quad (15)$$

2.2.3 交点 G 的修正

当 $(y_G - y_B)\cos\varphi > (x_B - x_G)\sin\varphi$, 即在雷电入射角为 φ 时, 通过式(9)坐标变换后, 保护弧与暴露弧交点 G 的纵坐标大于点 B 的纵坐标, 如图1中 G 、 B 点的关系。暴露弧投影的右端点为交点 G 的投影, 交点 G 的坐标为

$$\begin{cases} x_G = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4(1 + \tan^2\theta)C}}{2(1 + \tan^2\theta)} \\ y_G = -x_G \tan\theta + r / \cos\theta \end{cases} \quad (16)$$

其中

$$\begin{cases} B = -2x_B + 2\tan\theta(y_B - r / \cos\theta) \\ C = x_B^2 + (r / \cos\theta - y_B)^2 - r_c^2 \end{cases} \quad (17)$$

当 $(y_G - y_B)\cos\varphi \leq (x_B - x_G)\sin\varphi$, 即在雷电入射角为 φ 时, 通过式(9)坐标变换后, 交点 G 的纵

坐标不大于点 B 的纵坐标, 如图2a中 G 、 B 点的关系。暴露弧投影的右端点是斜率为 k_φ 的直线与暴露弧的切点, 因此应将交点 G 的坐标修正为

$$\begin{cases} x_G = x_B + \frac{|k_\varphi| r_s}{\sqrt{k_\varphi^2 + 1}} \\ y_G = \begin{cases} y_B + \frac{r_s}{\sqrt{k_\varphi^2 + 1}} & \varphi \in \left[-\frac{\pi}{2}, 0\right] \\ y_B - \frac{r_s}{\sqrt{k_\varphi^2 + 1}} & \varphi \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right] \end{cases} \end{cases} \quad (18)$$

2.3 绕击跳闸率计算

在雷电流为 I 、雷电入射角为 φ 时, 保护弧的正投影长度为 l_{HF} , 暴露弧的正投影长度为 l_{FG} , 雷电绕击率 $P_\varphi(I)$ 的计算公式为

$$\begin{cases} l_{HF} = (x_F - x_H)\cos\varphi - (y_F - y_H)\sin\varphi \\ l_{FG} = (x_G - x_F)\cos\varphi - (y_G - y_F)\sin\varphi \\ P_\varphi(I) = \begin{cases} l_{FG} / (l_{HF} + l_{FG}) & l_{FG} > 0 \\ 0 & l_{FG} < 0 \end{cases} \end{cases} \quad (19)$$

因此在雷电流为 I 时, 雷电绕击率 $P(I)$ 为

$$P(I) = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} g(\varphi) P_\varphi(I) d\varphi \quad (20)$$

雷电绕击闪络概率 P_{sfr} 的计算式为

$$P_{sfr} = \int_{I_0}^{I_{\max}} f(I) P(I) dI \quad (21)$$

式中, $f(I) = 0.026 \times 10^{-0.011I}$; I_0 、 $I_{\max}$ 分别为耐雷水平电流、最大绕击电流。

于是绕击跳闸率 n 计算式可表示为

$$n = N \eta P_{sfr} \quad (22)$$

3 实例分析

以典型的500 kV双回直线鼓型杆塔SZT3为例, 其结构和尺寸^[14]如图5所示。

计算条件: 避雷线弧垂取7 m, 绝缘子串长度取5 m, 导线电压取408.25 kV, 导线弧垂取12 m。

在不同地面倾角下, 改进前后绕击跳闸率计算结果如表1所示。

由表1中可知, 两种方法计算结果均表明地面倾角的增大能显著增大绕击跳闸率, $\theta = 25^\circ$ 时的绕

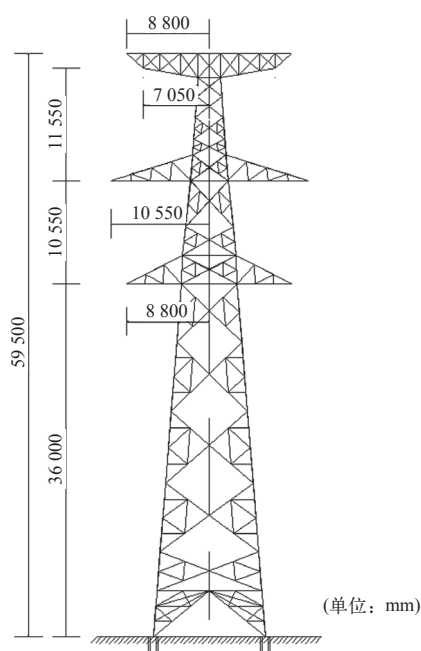


图5 鼓型杆塔结构和尺寸

表1 改进前后不同地面倾角下的绕击跳闸率

地面倾角(°)	5	10	15	20	25
传统EGM	0	0.003	0.082	0.262	0.531
改进EGM	0	0.003	0.086	0.277	0.572
增大(%)	0	0	4.88	5.73	7.72

击跳闸率是 $\theta = 10^\circ$ 时的百余倍,这说明线路经过地面倾角较大的山区地带时更容易发生雷电绕击跳闸事故,也与实际运行经验相符。在地面倾角较小时,两种模型计算结果几乎相同;在地面倾角为 25° 时,改进EGM比传统EGM增大7.72%。这是因为未修正交点缩短了暴露弧的投影,保护弧的投影基本不变,而使绕击率偏小,从而使绕击跳闸率偏小;这也与传统EGM在地面倾角较大的地方计算结果比实际运行偏小相符,故通过修正击距曲线交点的坐标能提高绕击跳闸率计算的准确度。

在地面倾角为 25° 时,改变保护角的大小,计算结果如表2所示。

表2 改进前后不同保护角下的绕击跳闸率

保护角(°)	0	2.5	5	7.5	10
传统EGM	0.232	0.347	0.494	0.675	0.894
改进EGM	0.242	0.366	0.529	0.742	1.008
增大(%)	4.31	5.48	7.09	9.93	12.75

由表2中可知,减小保护角是降低绕击跳闸

率的有效措施;这是因为保护角增大时,不仅增加了暴露弧投影长度,而且减小了保护弧投影长度。在保护角为 0° 、 5° 和 10° 时,改进EGM计算结果比传统EGM分别大4.31%、7.09%和12.75%。随着保护角的增加,同一雷电流在某一雷电入射角下,改进EGM考虑了双回线路均可能发生绕击跳闸,并且随着保护角的增加而增加。因此,在地面倾角较大时,随着保护角的增加,传统EGM计算结果偏小越严重。

由于输电线路所经地区地形地貌的多样性,同一塔型下呼称高度有多种选择。在地面倾角 25° 时,改进前后绕击跳闸率计算结果如表3所示。

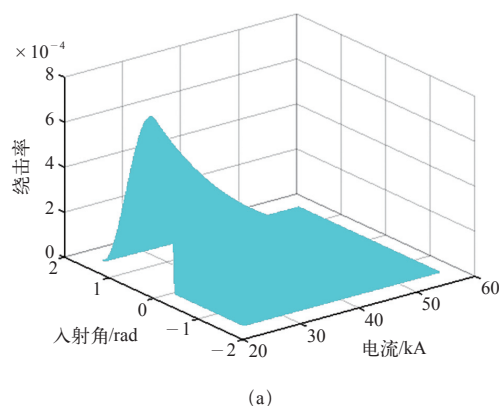
表3 改进前后不同呼称高度下的绕击跳闸率

呼称高度/m	27	30	33	36
传统EGM	0.053	0.154	0.312	0.531
改进EGM	0.055	0.162	0.332	0.572
增大(%)	3.77	5.19	6.41	7.72

从表3中可知,呼称高度越低,绕击跳闸率越低。这是因为低杆塔呼称高度不仅减少了线路每年的落雷次数,还大大增强了地面对输电线的屏蔽作用。对比表2可知,在继续减少保护角对降低绕击跳闸率效果不明显时,通过合理降低呼称高度可解决该问题。

在地面倾角为 25° 时,绕击电流、雷电入射角和绕击率的关系如图6a所示,旋转图6a可得图6b和图6c。

从图6中可看出,随着雷电流的增大,绕击率以非线性的凹函数减小;幅值相同的雷电流在不同入射角下,绕击率也具有显著性差异。在 $\varphi < 0^\circ$



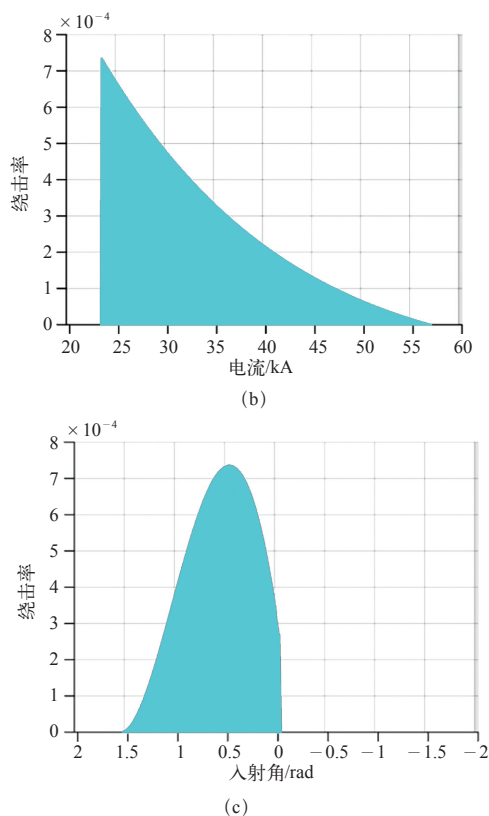


图6 雷电入射角、雷电流和绕击率的关系

时, 绕击率仍然大于零, 这说明雷电仍可能击中导线。入射角为 30° (0.5236 rad) 左右时, 绕击率达到最大值, 其值是雷电垂直入射时的3倍多。因此, 在绕击跳闸事故中, 雷电倾斜击中导线比竖直击中导线可能性大。

4 结束语

1) 输电线路的绕击跳闸率随地面倾角、保护角和呼称高度的增加而增大; 在地面倾角较大的地方, 通过修正击距曲线交点的坐标提高了绕击跳闸率计算的准确度。

2) 在地面倾角较大的山区, 继续减小保护角对降低绕击跳闸率效果不明显时, 合理降低杆塔高度效果更好。

3) 在绕击跳闸事故中, 雷电倾斜击中导线比竖直击中导线可能性大。

参考文献

[1] 钱冠军. 500 kV线路直击雷典型事故调查研究

[J]. 高电压技术, 1997, 23 (2): 73-75.

[2] 谷定燮, 戴敏, 李志军, 等. 1 000 kV同塔双回路双回故障跳闸概率分析 [J]. 高电压技术, 2009, 35 (3): 441-444.

[3] IEEE Standard 12344-1997 IEEE Guide for improving the lightning performance of transmission lines [S].

[4] 维列夏金, 吴维韩. 俄罗斯超高压和特高压输电线路防雷运行经验分析 [J]. 高电压技术, 1998, 24 (2): 76-79.

[5] 彭向阳, 周华敏. 广东电网防雷现状分析及建议 [J]. 南方电网技术, 2010, 4 (3): 87-91.

[6] 李景禄. 高电压技术 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008: 175-203.

[7] 陈国庆, 孙志劲, 孙才新, 等. 输电线路耐雷计算方法的研究现状分析 [J]. 重庆大学学报, 2003, 26 (5): 137-142.

[8] 颜喜平. 220 kV同塔双回输电线路防雷性能研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2009: 1-45.

[9] 梁贵书, 康琛, 苏红梅, 等. 山区输电线路绕击暴露弧计算与分析 [J]. 高压电器, 2013, 49 (4): 86-91.

[10] 张志劲, 司马文霞, 蒋兴良, 等. 超/特高压输电线路雷电绕击防护性能研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (10): 1-6.

[11] 彭谦, 李军, 卞鹏, 等. 改进电气几何模型法在1 000 kV输电线路雷电绕击跳闸率计算中的应用 [J]. 电网技术, 2010, 34 (9): 155-159.

[12] 李瑞芳, 吴广宁, 曹晓斌, 等. 输电线路雷电绕击率的三维计算方法 [J]. 电工技术学报, 2009, 24 (10): 134-138.

[13] 李瑞芳, 吴广宁, 曹晓斌, 等. 山区输电线路雷电绕击跳闸率的计算 [J]. 电网技术, 2010, 34 (12): 142-146.

[14] 曹福成, 张强, 刘亚新. 输电线路塔型手册 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 1-337.

(收稿日期: 2017-01-12) **EA**