基于雷击距模型的风力发电机雷击概率的计算

罗佳俊[1]　袁　娜[2]

（1. 深圳市盾牌防雷技术有限公司，广东 深圳　518132；
2. 内蒙古杭锦旗气象局，内蒙古 鄂尔多斯　017000）

摘要　本文通过分析风力发电机遭受的年平均直击雷频率计算公式，指出其存在的缺陷，并通过对比两种接闪模型，根据雷击距的概念，为风力发电机提供了一个电气-几何模型，用于计算一个已知雷击大地密度区域可能遭受的雷击风险。以一个典型的风力发电机为例，计算被一个负地闪击中的概率，以便更好地对风力发电机的雷击风险进行评估，同时为风力发电场的选址提供一个科学的数据。

关键词：雷击距模型；接闪模型；雷击概率

Calculation of Wind Turbine Lightning Strike Probability Based on the Striking Distance Model

Luo Jiajun[1]　*Yuan Na*[2]

(1. Shenzhen DOWIN Lightning Technologies Co., Ltd, Shenzhen, Guangdong　518132;
2. Hangjinqi Weather Bureau, Erdas, Inner Mongolia　017000)

Abstract　According to analyze the average direct lightning frequency calculation formula of wind turbine, point out the deficiencies of formula, and provide a electro-geometric model through contrasting two types lighting mode, which used to calculate the risk of suffering the directly lighting. taking a typical wind turbine as a example, calculate the frequency of suffering by a Negative lightning, be better to evaluate the lightning risk assessment of wind turbines, also provide a scientific data for the wind farm's location selection.

Key words：striking distance model; air-terminal model; lighting striking frequency

随着风电装机容量的不断提高，因遭受雷电而产生的经济损失也日渐突出。对于风力发电机遭受雷击时的危害以及所应采取防护措施的研究逐渐成为雷电研究的一项重要内容[1]。因此，过去研究雷击概率的对象都是静物，而风力发电机的叶片处于有规律的旋转状态，风力发电机的高度在一个范围内重复变化，因此风电发电机的雷电风险评估，特别是雷击概率的评估，对于研究整个风电系统的雷击规律、雷电产生的破坏性和风电场的选址都具有重要的作用。

1　当前风力发电机的预计雷击次数的评估方法和缺陷

雷电对风力发电机最为严重的直接破坏对象是叶片，同时还会引起更多的间接性破坏，这种损坏后果更为广泛。因此，风力发电机或者叶片遭受直击雷的频率成为雷击风险评估的重要研究对象，科学的评估方法不但可以认识风力发电机的雷击规律，还可以提高风力发电机叶片和其他如控制系统和电力系统的雷电防护措施的效果。

任何关于雷击风险评估的第一阶段都是雷击频率的评估，对风力发电机进行雷击风险评估时也不例外。最新的 IEC 61400-24《Wind turbines-Part 24: Lightning protection 给出的计算年平均遭受的直击雷频率公式为[2]

$$N_{\mathrm{d}} = N_{\mathrm{g}} A_{\mathrm{d}} C_{\mathrm{d}} 10^{-6} \qquad (1)$$

式中，N_{d}为为风力发电机所遭受的年平均直接雷击数量；N_{g}为风力发电机所处地区雷击大地的年平均密度；A_{d}与风力发电机截收相同雷击次数的等效面积；C_{d}为环境因数。风力发电机在平地上安装时适

合取 C_d =1，在山地或山坡上安装时适合取 C_d =2。

上述因子中，N_g 可以从雷电监测预警系统中获取；C_d 为校正系数，可以根据风力发电机所处的位置进行调整。与静态构筑物的等效截收面积不同，由于风力发电机的叶片一直处于变化中，因此它的等效面积应该也是处于变化中的一种状态。

IEC 61400-24 中规定，风力发电机的等效截收面积 A_d 是以塔筒为圆心，三倍于最大高度的一个圆。

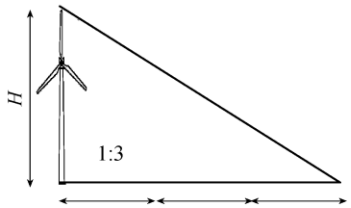


图 1　风力发电机的等效截收面积计算

因此与风力发电机截收相同雷击次数的等效面积 A_d 有关的参数为高度，公式为 $A_d=9\pi H^2$。其中，H 为风力发电机的最大高度，该方法显然忽略了一点，那就是风力发电机的叶片是一直处于旋转中，即风力发电机的最大高度一直处于变化中。为了更加精确地计算等效截收面积，应该以叶片的旋转角度为变量，分析其高度的变化规律，并运用电气-几何模型分析叶片的接闪模型。这也是本文重点介绍的接闪模型。

2　高压架空线的电气-几何模型介绍

2.1　影响物体可能遭受直接雷击的击距

雷击距是电气几-何模型中一个重要的概念，它本质上表示了雷电先导对目标物之间的临界击穿场强[3]。击距决定了避雷针，被保护物、大地三者之间的受雷击范围，也决定了这三者的相对引雷能力。随着击距的增加，三者之间的引雷能力发生变化。

当下行先导从雷云向地面发展时，如果先导头部离地面较远，则先导的下行发展取向具有明显的随机性，不受地面上物体的影响。只有当先到发展到接近某一物体的定向范围是，它才会定向地想该物体发展，使之受到雷击，这种定向临界距离称为击距[4]。

2.2　EGM 模型

避雷针保护静止的构筑物时采用的滚球半径计算方法采用了 EGM 模型，它认为，雷电先导首先进入哪一物体的雷击距离，就对那一物体放电。其建立的电气—几何模型只于雷电流的大小有关，公式如下[5]：

$$S=10I^{0.65} \qquad (2)$$

式中，S 为雷击距离，m；I 为雷电流强度，kA。

2.3　LPM 模型

在 EMG 模型的基础上发展而来的先导传播模型理论 LPM 提出，确定雷击点除了考虑雷击距以外，还要考虑下行先导和迎面先导的相对运动。因为不同形状、高度的地物，在同一雷电流的下行先导作用下感应的电场强度不同，所以一定几何形状和高度的地物能否被一定雷电流幅值的雷电击中，其吸引半径 R_a 来表述。R_a 不仅是雷电流的函数，也是地物高度的函数，并和地物的几何形状有关，公式如下[6]

$$R_a(I,h)=2.83I^{0.63}h^{0.40} \qquad (3)$$

式中，R_a 为吸引半径，m；I 为雷电流幅值，kA；h 为针状物高度，m。

两种理论最大的差别在于，EGM 理论认为当避雷针超出临界半径的部分没有保护范围，否认了高避雷针对于雷电的接闪能力。而 LPM 理论认为保护半径随着避雷针的高度而增加，更加直观地用电磁场的理论解释了接闪的原理，而这个理论特别适合于高度远远超过了 60m 的风力发电机，这也是本文在对雷击风电发电机的雷击频率评估时为什么不能用固定的高度去评估的重要原因。因为随着风力发电机叶片的转动，会影响周围磁场的变化，而这种变化将直接影响雷电下行先导的方向，即影响风力发电机直击雷的接闪点。

3　风力发电机遭受雷击的频率评估

3.1　评估模型的假设

该模型在高压电力线路绕击的模型上演变而来，其最重要的假设是当雷电下行先导进入结构的雷击区域时，可以使其被吸引到结构上，绕击模型如图 2、图 3 所示[7]。

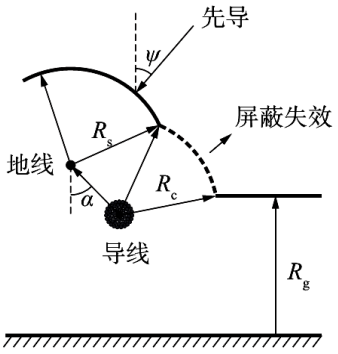


图 2　绕击模型——保护失效

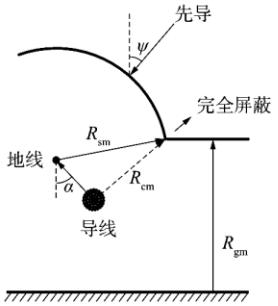


图 3　绕击模型——保护有效

对于高度超过 120m 以上的风力发电机，发生向上先导的可能性较大，特别是在叶尖和机舱顶部安装接闪器后，可以比较准备地把雷电吸引过来，并利用引下装置把雷电泄放入地。

本文中的模型适合于 100m 以下的风力发电机，假设所有的下行先导都为负闪电，且雷击先导头部的发展方向完全是垂直的。当高度超过 100m 时可能会发生先导向上的风险[8]。由于大部分已经安装的风力发电机都在 100m 以下或接近 100m，这种假设是合理的，尽管有可能低估雷击的风险。第二种假设是雷击距离 S。对于风力发电机，由于风力发电机的总体高度随着叶片的旋转一直在变化，所以与普通建筑物相比，雷击距除与雷电流的大小有关外，还跟风力发电机的高度有关。

3.2　根据雷击距提出的接闪模型

图 4 是一个接闪器高度大于地闪击距的模型，该电气模型表明一个下行先导进入雷击区域时会被接闪器吸引过来。如果先导失去接闪器的接闪区域，将会进入地闪雷击区域，它是一个厚度为βS，与地面垂直的区域。可以发现，接闪器的雷击区域与地面的接闪区域完全不重合，所以，接闪器的雷电接收区域是个圆形区域，半径 r 等于 S，为接闪器的保护范围。如图 4 所示，S 为滚球法电气-几何模型中的击距。

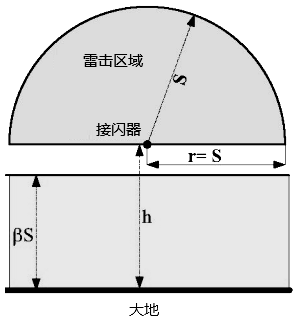


图 4　接闪器高度大于击距的接闪模型

图 5 为接闪器的高度比地闪的击距小的模型，接闪器的接闪区域和大地的接闪区域发生了部分重合，这个等效接收面积是一个圆减去半径的公式：

$$r=\sqrt{2\beta Sh-h^2+S^2(1-\beta^2)} \tag{4}$$

式中，h 为接闪器的高度，m。

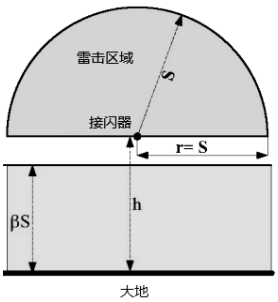


图 5　接闪器高度小于击距的接闪模型

3.3　风力发电机的结构模型

如图 6 所示的，风力发电机暴露在环境中的主要的部分是塔筒，机舱和轮毂。轮毂连接的三个叶片是最容易遭受直击雷的，因为它比其他组成风机的部件都高。图还显示了轮毂在风中转动时的宽度和高度随轮毂的转动而改变。为了计算雷击次数，旋转的叶片看做是一个正规的矩形，风力发电机的旋转周期中，宽度 W 定期地改变六次，也就是说它的变化周期是 60°，第一次宽度的变化周期在 0～60°之间，宽度由下式表示：

$$w(\theta_A)=L\left[\cos\theta_A-\cos\left(\theta_A+\frac{2\pi}{3}\right)\right] \tag{5}$$

式中，L 是风力发电机叶片的长度；θ_A 是叶片 A 与 x 轴的夹角。同理，最大高度 h 变化三次在风力发电机转动的一个周期内，第一次完整的高度变化时角度在 30°～150°之间，高度 h 用下式表示，H 是轮毂的高度。

$$h(\theta_A)=H+L\sin\theta_A \tag{6}$$

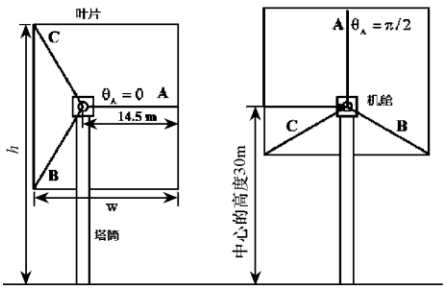


图 6　风力发电机结构模型

3.4　雷击概率的计算

电气-几何模型适用于风力发电机，风力发电机机舱的等效截收面积如图 7 所示，机舱的等效截收面积可以忽略，因为它的等效截收面积对整体的可

以忽略不计，叶片的等效截收面积是与角度θ_A和电流I有关的函数，因为r已经给出。

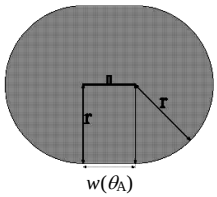


图 7　风力发电机雷电等效截收面积

$$r = r_1 = 10I^{0.65},\quad I \leqslant I_B \tag{7}$$

$$r = r_2 = \sqrt{20\beta h I^{0.65} - h^2 + (10I^{0.65})^2(1-\beta^2)},\ I > I_B \tag{8}$$

式中，I_B是边界电流，通过对式（7）进行变换，可以用关于θ_A的一个函数表示：

$$I_B(\theta_A) = \exp\left(\frac{\ln(h(\theta_A)/10\beta)}{0.65}\right) \tag{9}$$

如果风力涡轮发电机所在位置的雷击大地密度 N_g已知，那么年雷击次数N_d为

$$N_d = N_g \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} A_d P_I P_{\theta_A} \mathrm{d}I \mathrm{d}\theta_A \tag{10}$$

式中，A_d由图 4 得出，单位 km^2。

$$A_d = \pi r^2 + 2rw(\theta_A) \tag{11}$$

由式（9）和式（11）带入式（10）得

$$N_d = N_g \int_0^{2\pi} \left[\int_0^{I_B(\theta_A)} (\pi r_1^2 + 2r_1 w(\theta_A)) P_I \mathrm{d}I + \int_{I_B(\theta_A)}^{\infty} (\pi r_2^2 + 2r_2 w(\theta_A)) P_I \mathrm{d}I \right] P_{\theta_A} \mathrm{d}\theta_A \tag{12}$$

式中，P_I 和 P_{θ_A}是雷电流和角度各自的概率密度函数，因为发生雷击时，角度可以是 0～2π 之间的任何一个角度，角度的概率密度分布函数是一样的，即

$$P_{\theta_A} = \frac{1}{2\pi},\ 0 \leqslant \theta_A \leqslant 2\pi \tag{13}$$

假设一个风力发电机的高度在 10m 到 100m 之间，雷电回击的密度 39kA，不知道风力发电机的雷击电流，假设为 39kA，雷击电流的概率密度函数P_I由下式获得[9]，即

$$P_I = \frac{(2.6/39)(I/39)^{1.6}}{\left[1+(I/39)^{2.6}\right]^2} \tag{14}$$

以一个典型的塔筒高度为 30m 风力发电机为例，是因为它的尺寸跟很多老的发电机一样。风力发电机叶片的平均长度 L=14.5m，h=30m，最大高度 42m。此风力发电机的β值不知道，但是根据架空高压线的绕击理论，超高压电线路中该值是 0.8，高压电 0.67。经过计算，雷击次数为$0.0375N_g$，当L=23.5m、h=40m时，年最大雷击次数可以达到 $0.0491N_g$。

因此，风力发电机雷击距模型中的β值实际上就是电力输电线路中的雷击距系数，由此我们可以计算出风力发电机的年预计雷击次数。

4　结论

本分通过分析目前风力发电机遭受直击雷概率计算方法存在的问题，通过对两种电气-几何模型的利弊分析，利用绕击模型，得出高度在 100m 以下的风力发电机的雷击概率模型，并给出计算公式。对于高度超过 100m 的风力发电机，雷击过程中由于上行先导的概率比较大，受叶片旋转的影响不大，因此本文提出的电气-几何模型对于下行先导且高度小于 100m 的动态构筑物的雷击概率计算评估具有通用性。为风力发电机的雷击风险评估，特别是雷击概率的计算提供了一种新方法。

参考文献

[1] 李丹, 张义军, 吕伟涛. 风力发电机叶片姿态与雷击概率关系模拟分析[J]. 应用气象学报, 2013, 24(5): 585-594.

[2] IEC 61400-24. Wind Turbines-Part 24: Lightning Protection.

[3] 何俊佳, 李晓岚, 尹小根. 输电线路雷电绕击击距系数实验研究与理论分析[J]. 南方电网技术研究, 2006, 2(2): 22.

[4] 张小青. 风电机组防雷与接地[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.

[5] GB 50057—94 (2010 版) 建筑物防雷设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2011.

[6] 马宏达. 避雷针保护范围的模拟试验理论与争议[J]. 工科物理 1998 年副刊, 1998: 16-23.

[7] 廖永力, 李锐海, 蔡汉生. 高压输电线路雷电绕击分析方法及模拟试验研究[J]. 南方电网技术, 2012, 6(4): 7-10.

[8] 郄秀书, 张其林, 袁铁. 雷电物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2013.

[9] General Electric Company. Transmission Line Reference Book 345 kV and Above[Z]. Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute, 1982.

作者简介

罗佳俊（1984-），男，本科，Smiths Power 研发工程师，主要研究方向为雷电防护产品研发，雷击风险评估和价值工程管理工作。