

风电机组的雷电暂态过电压统计研究

陶世祺, 张小青, 王耀武, 苏萌萌, 林炎华

(北京交通大学电气工程学院, 北京 100044)

摘 要: 从首次短时间正雷击和首次短时间负雷击的雷电流波形出发, 根据雷电流的累积概率密度函数和概率加权算法推导出在雷电流激励下机组上出现暂态过电压的统计计算公式。在建立集浆叶、轴承、塔筒和接地装置于一体的风电机组暂态等值电路模型后, 运用实验结果对该模型进行校验。以该暂态等值电路模型为基础, 统计计算风电机组上的暂态过电压, 确定过电压沿风电机组本体的分布特性, 并将该过电压统计值与采用标准规程法计算出的过电压值进行对比。结果表明, 在同样的雷电流波形条件下, 暂态过电压的统计值明显低于规程法计算的暂态过电压值。

关键词: 风电机组; 雷击; 概率密度函数; 统计过电压; 电路模型

中图分类号: TM863

文献标识码: A

0 引 言

兆瓦级大容量风电机组的高耸突出结构, 易遭受直接雷击^[1], 在风电机组受雷击接闪时, 雷电流将从雷击点(桨叶叶尖)注入, 沿风电机组本体和接地装置散入大地。在此暂态传输过程中, 雷电流将在风电机组上产生较高的暂态过电压, 可能导致桨叶损坏, 也可能影响风电机组内电气和电子设备的安全运行。雷电放电涉及大气环境、海拔高度、土壤条件和被击物体形状等诸多因素, 表现出较大的随机性^[2], 相应地, 注入被击物体的雷电流也表现出明显的随机特征。经过长期的雷电观测, 我国和一些国际组织从各自不同地域的观察数据出发, 已建立若干种雷电流幅值的累积概率函数以供防雷设计使用^[3-6]。但就迄今公布的文献和数据来看, 国内外研究人员在进行风电机组的雷击暂态过程分析时, 均采用固定雷电流幅值的方法来计算雷电暂态响应^[7-10], 即先根据标准规程确定风电机组的防雷等级, 再按该防雷等级来查取固定的雷电流幅值, 对风电机组进行单次暂态模拟, 将由此获得的结果即规程法计算的过电压值作为防雷设计的依据。显然, 这种现行做法将不能统计地刻画风电机组雷击

暂态的实际行为, 无法为风电机组的防雷提供精确依据。为此, 本文拟在风电机组的雷击暂态统计分析方面开展进一步工作, 从雷电流的累积概率密度入手^[3], 选择合理的雷电流统计幅值范围, 在该范围内任意一个幅值点上, 利用概率加权来计算该点过电压值的加权值, 最后将该范围内所有的加权值累加, 得到过电压的统计值。该范围内每个单点上的过电压计算通过建立风电机组的等值电路模型并运用 PSCAD 仿真来实施, 电路模型的有效性将采用实验结果来加以验证^[11, 12]。本文还就风电机组上的过电压统计值与规程法计算的过电压值进行比较, 结果表明在风电机组上的任意位置处前者明显低于后者。

1 雷电参量选择与概率统计算法

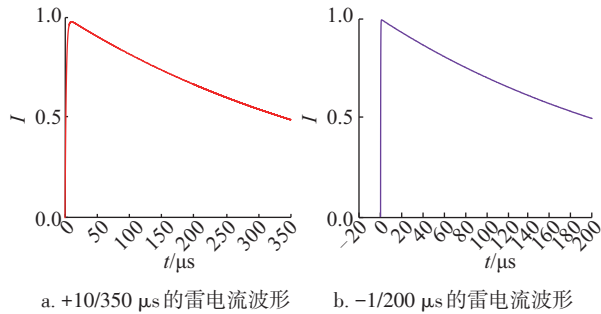
雷电可被认为是一个电流源, 雷电流波形通常由幅值 I 、波头时间 T_1 和半峰值时间 T_2 这 3 个参数来拟定^[13]。雷电流参数决定了给予桨叶或雷电防护系统硬件造成的物理伤害程度。按照我国风电机组的防雷设计标准^[14], 本文选取 2 种雷电流波形作为注入风电机组的电流源, 分别为首次短时间正雷击“+10/350 μ s”和首次短时间负雷击

收稿日期: 2018-06-13

基金项目: 国家自然科学基金(51420105011)

通信作者: 陶世祺(1990—), 男, 博士研究生, 主要从事电力系统及风力发电机组的电磁暂态数值计算及过电压防护等方面的研究。
13121467@bjtu.edu.cn

“-1/200 μs ”。2 种雷电流的波形如图 1 所示,其幅值均以 1 标定。



a. +10/350 μs 的雷电流波形 b. -1/200 μs 的雷电流波形
图 1 2 种雷电流波形

Fig. 1 Two kinds of lightning current waveforms

在防雷设计标准[14]中还规定了 4 种雷电防护等级(I~IV 级)。对于每种等级,标准中给出了相应雷电流幅值的最大值和最小值,其幅值范围如表 1 所示。

表 1 雷电防护 I~IV 级的雷电流幅值范围

Table 1 Peak value ranges of lightning current under I~IV level of lightning protection

雷电流波形	雷电流幅值/kA			
	I 级	II 级	III 级	IV 级
+10/350 μs	3~200	5~150	10~100	16~100
-1/200 μs	-3~-100	-5~-75	-10~-50	-16~-50

雷电流幅值作为表征雷击强度的主要参数,是一个随机变量,服从一定的概率分布,该随机特性通常用累积概率函数加以表示。由于雷电流的随机特征,对于首次短时间正雷击和首次短时间负雷击在风电机组上产生的暂态过电压幅值就可以进行统计分析。在我国大部分地区,雷电流幅值超过 I 的累积出现概率由式(1)得到^[3]:

$$P_s(I) = 10^{-\frac{I}{88}} \quad (1)$$

式中, I ——雷电流幅值, kA; $P_s(I)$ ——超过 I 的雷电流幅值累积概率。

由式(1)可绘制雷电流幅值的累积概率曲线,见图 2。雷电流幅值累积概率还可采用雷电流幅值小于某一数值的累积概率函数 $P_L(I)$ 表示, $P_L(I)$ 与 $P_s(I)$ 之间的关系为:

$$P_L(I) = 1 - P_s(I) \quad (2)$$

在现已开展的风电机组的雷电暂态分析中,一般不考虑雷电流幅值的随机特征。通常的做法是选取某一防护等级中的雷电流的上限幅值,例如常

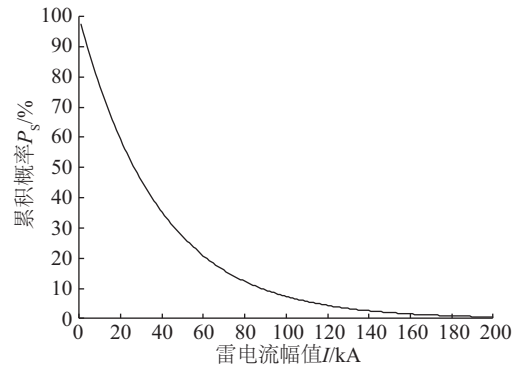


图 2 雷电流幅值累积概率曲线

Fig. 2 Cumulative probability curve of lightning current peak values

选取 III 级防护中的 100 kA 作为注入雷电流源的电流值^[15, 16]。但是,由式(1)可知,100 kA 以上的雷电流出现的累积概率仅有 7.31%,如果按该上限幅值进行雷电暂态计算,所获得的过电压将明显偏高,相应防护成本也将过高。为了充分计及雷电流幅值的实际随机特征,引入雷电流概率密度公式,通过对 $P_L(I)$ 求取 I 的一阶导数,可得雷击概率密度 $q(I)$ 为:

$$q(I) = \frac{dP_L(I)}{dI} \quad (3)$$

将雷电流幅值范围等分为许多电流的区间 ΔI , 令 $q(I) = \Delta I$, 则幅值为 I 时的雷电流出现的概率为^[17]:

$$P_a(I) = q(I) \cdot \Delta I \quad (4)$$

设以幅值 I 为激励的雷电流注入风电机组时,风电机组某位置处产生的暂态响应过电压幅值为 $U(I)$, 则以雷电流出现概率为基础的加权过电压幅值为:

$$dU_a(I) = P_a(I) \cdot U_a(I) = q(I) \Delta I \cdot U_a(I) \quad (5)$$

对整个雷电流幅值区间 $I_{\min} \sim I_{\max}$ 的概率加权过电压进行累加,可得机组上暂态过电压的统计值 U_s ^[5]为:

$$U_s = \sum_{I_{\min}}^{I_{\max}} dU_a(I) = \sum_{I_{\min}}^{I_{\max}} q(I) U_a(I) \Delta I \quad (6)$$

2 风电机组的建模与试验验证

为反映雷电波沿导体传输时的流动波特性,在对风电机组上各部分导体组件进行建模时,必须对导体进行分段。分段导体的长度应小于雷电流波上限截止频率所对应波长的 1/10^[18]。表 2 为上限

截止频率 f 、最高次谐波波长 λ_c 及导体最大分段长度 Δl_{\max} 的相关数据。

表2 典型雷电流波上限截止频率 f 、最高次谐波波长 λ_c 及导体最大分段长度 Δl_{\max}

Table 2 Maximum frequency f , highest harmonic wavelength λ_c and largest segment-length Δl_{\max} of typical lightning waveforms

波形	f/Hz	λ_c/m	$\Delta l_{\max}/\text{m}$
+10/350 μs	1.20×10^6	250	25
-1/200 μs	4.35×10^6	68	6.8

2.1 桨叶

风电机组的桨叶所采用的雷电保护系统通常是在桨叶叶尖处安装接闪器,由桨叶内部的一条引下线将雷电流从接闪器传导至叶片根部^[14],如图3所示。常用的引下线为铜质导线,在实际使用过程中,对于长达30~60 m的风电机组桨叶的雷电保护效果较好。雷击发生时,该长直导线作为雷电流的引流路径,可等效为竖直传输线,其分段导体的长度可根据表2截取。

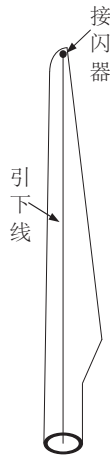


图3 桨叶及引下线示意图

Fig. 3 Schematic diagram of blade and down-conductor

导体的电阻受雷电流的高频特性影响,不能仅以工频或直流时的计算公式表示,每段导体的电阻可由式(7)确定^[19]:

$$R = \frac{\sqrt{\mu f} \cdot \Delta l_b}{2r_b \sqrt{\pi \sigma}} \quad (7)$$

式中, r_b ——导体的半径, m; μ ——导体的磁导率, H/m; σ ——导体的电导率, S/m; f 的值可由表2得到。

分段导体的电容可利用平均电位法进行计算^[20]。对于长度为 Δl_b 的第 b 段导体,对应的上下两端点的竖直坐标分别为 y_b 和 y_{b-1} ,如图4所示。

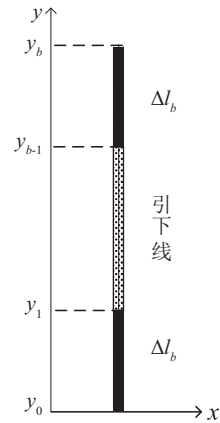


图4 引下线导体分段

Fig. 4 Piecewise down-conductor system

分段导体的电容可由式(8)获得:

$$C_b = \frac{2\pi\epsilon_0\Delta l_b}{B_1 + B_2} \quad (8)$$

式中,

$$B_1 = \frac{1}{\Delta l_b} \left[y_b \sinh^{-1} \left(\frac{-2y_b}{r_b} \right) + y_{b-1} \sinh^{-1} \left(\frac{-2y_{b-1}}{r_b} \right) - (y_b + y_{b-1}) \sinh^{-1} \left(\frac{-y_b - y_{b-1}}{r_b} \right) + \frac{1}{2} \sqrt{r_b^2 + 4y_b^2} + \frac{1}{2} \sqrt{r_b^2 + 4y_{b-1}^2} - \sqrt{r_b^2 + (y_b + y_{b-1})^2} \right]$$

$$B_2 = \sinh^{-1} \left(\frac{\Delta l_b}{r_b} \right) - \frac{\sqrt{r_b^2 + \Delta l_b^2}}{\Delta l_b} + \frac{r_b}{\Delta l_b}.$$

任意分段导体的电感可利用诺依曼积分公式求得^[21,22]:

$$L_b = \frac{\mu_0}{4\pi\Delta l_b} \left[\Delta l_b \sinh^{-1} \left(\frac{l_b}{r_b} \right) - \sqrt{\Delta l_b^2 + r_b^2} + y_b \sinh^{-1} \left(\frac{-2y_{b-1}}{r_b} \right) + y_{b-1} \sinh^{-1} \left(\frac{-2y_{b-1}}{r_b} \right) - (y_b + y_{b-1}) \sinh^{-1} \left(\frac{-y_b - y_{b-1}}{r_b} \right) + \frac{1}{2} \sqrt{r_b^2 + 4y_b^2} + \frac{1}{2} \sqrt{r_b^2 + 4y_{b-1}^2} + r_b - \sqrt{r_b^2 + (y_b + y_{b-1})^2} \right] \quad (9)$$

按所计算出的 RLC 参数,将每段导体以一个 π 型电路来表示,则风电机组桨叶的等值电路模型可由若干个 π 型电路搭接而成,如图5所示。

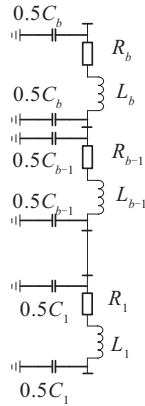


图5 π型等效电路

Fig. 5 π-type equivalent circuit of blade

2.2 轴承及运动接触部分

桨叶接闪后,雷电流经引导体根部进入轴承和电气执行器。处于雷电流路径的所有轴承和执行器系统都应该采取必要的保护措施,从而将流经部件的电流降低到一个可接受的水平。为了旁路轴承和执行器的雷电流,考虑采用火花间隙或滑动触点(电刷)即运动接触的旁路系统来进行防护。因此,由轴承和运动接触部分共同组成轴承模型。雷电流流过轴承时会出现明显的容性特征,该电容 C_s 由式(10)表示^[23]:

$$C_s = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln \left\{ \frac{D^2 - (R_1^2 + R_2^2)}{2R_1R_2} + \sqrt{\left[\frac{D^2 - (R_1^2 + R_2^2)}{2R_1R_2} \right]^2 - 1} \right\}} \quad (10)$$

式中, ϵ ——润滑油的介电常数, F/m; l ——主轴承的长度, m; D ——主轴承环轴线到滚子轴线的距离, m; R_1 ——滚子的半径, m; R_2 ——轴承环的半径, m。

运动接触部分的相关部件可集中用接触电阻 R_s 来表征,其值由实验数据估算^[24]。则轴承模型可等效为电容与电阻的并联电路,如图6所示。

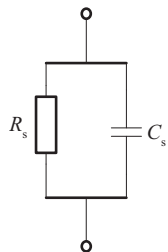
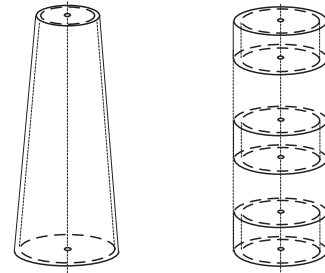


图6 轴承与运动接触部位等值电路

Fig. 6 Equivalent circuit model of main bearing and sport contact area

2.3 塔筒及接地装置

风电机组的塔筒为空心圆台管状结构,如图7a所示。实际的 MW 级风电机组的塔筒高度为几十米甚至上百米,相对于塔筒的高度来说,塔筒的顶端外半径与底端外半径之间的差值可近似忽略。因此,在仿真和计算中,可将空心圆台管状的塔筒近似等效为空心圆柱状,如图7b所示,本文中空圆柱状塔筒的等效外半径可取为实际塔筒的顶端外半径与底端外半径之平均值。塔筒的分段长度可根据2种雷电流波形的不同而分别进行选取,见表2。



a. 空心圆台管状塔筒 b. 空心圆柱状分段塔筒

图7 塔筒模型

Fig. 7 Model of tower

将分段后的塔筒进行暂态等值电路建模。对于任意段导体 $i(i=1,2,\dots,n)$, 每段导体的电阻 R_i 可由式(11)得到:

$$R_i = \left[1 + \left(\sqrt{\frac{q}{2}} - 1 \right) \left(1 - \frac{w}{r_o} - \frac{8}{4\sqrt{2q-5}} \left(\frac{w}{r_o} \right)^2 \right) \right] R_0 \quad (11)$$

式中, $q = 2\pi f \mu \sigma w^2$, 其中 μ 为导体的磁导率, H/m, σ 为导体的电导率, S/m; w ——塔筒的平均厚度, $w \approx r_o/100$ m; r_o ——塔筒的等效外半径, m; R_0 ——导体的直流电阻, Ω 。

分段导体电容 C_i 可由式(12)计算得到^[25]:

$$C_i = \frac{2\pi\epsilon_0 l_i}{\ln \frac{l_i}{r_o} - D_1} \quad (12)$$

式中, $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m; l_i ——分段导体长度, m; D_1 可由文献[25]得到。

每段导体的电感 L_i 由式(13)得到^[22]:

$$L_i = \frac{\mu_0 l_i}{2\pi} \left(\ln \frac{2l_i}{r_o} - 1 - \mu_r \ln \frac{r_o - w}{r_o} \right) \quad (13)$$

式中, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m; μ_r ——导体的相对磁导率, H/m。

塔筒的暂态等值电路如图 8 所示。该电路模型由分段塔筒的电阻 R_i 、分布电容 C_i 及电感 L_i 共同组成。

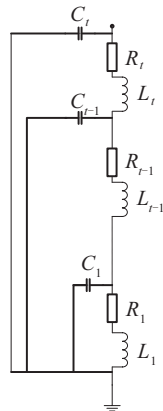


图 8 塔筒的等值电路模型

Fig. 8 Equivalent circuit of tower

对于机组的接地装置,国际电工委员会(IEC)及我国国家标准均建议采用 B 类布局^[14]。此类接地装置包括水平接地环、竖直接地极和连接导体,通过连接螺栓与塔筒进行电气连接。如图 9 所示,出于工程简化的目的,本文将接地装置的模型等效为若干个等值接地电阻并联的形式,接地电阻的阻值由设计标准限定。

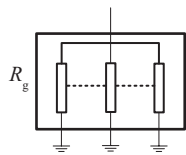


图 9 等值并联接地电阻

Fig. 9 Equivalent grounding resistance in parallel

在计算得到风电机组上各个主要部分的等值电路后,将它们按照雷电流流经风电机组的固有路径次序连接起来,即可建立风电机组的整体电路模型,如图 10 所示。雷击桨叶被模拟为一个雷电流源注入到对应于雷击点的桨叶叶尖处。

2.3 实验验证

风电机组的雷电暂态研究可借助于实验室内缩小比例的模型来实施^[11],基于冲击电流波形参数和实验室物理空间的考虑,本文选取的实验模型与实际风电机组的尺寸比例为 1:40。按照文献[11,12]中实验平台搭建方法进行布置(如图 11 所示), R_n 为无感电阻,钢板模拟理想大地,测量电压的引线与冲击电流注入引线之间相互正交,以减少导线间

的电磁干扰,电压引线的接地端距风电机组大于 5 m 以模拟 0 电位参考点。

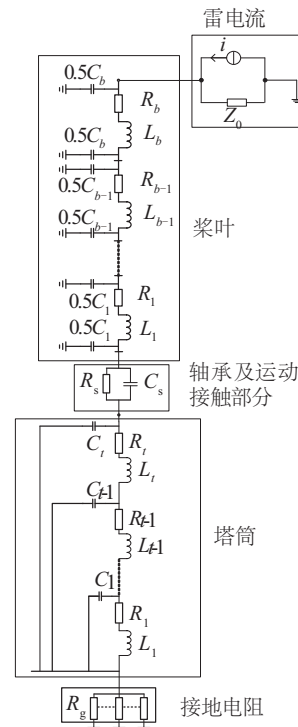


图 10 风电机组的整体等值电路模型

Fig. 10 Complete equivalent circuit model of wind turbines

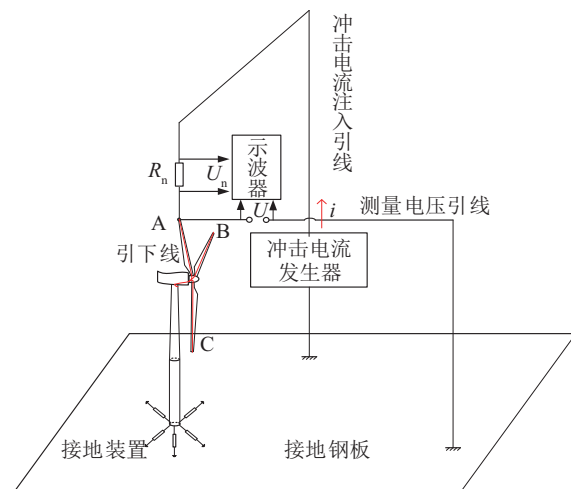
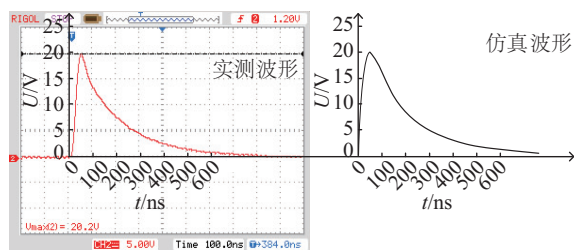
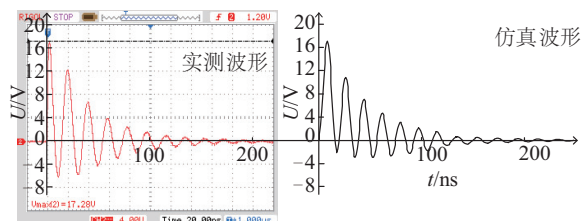


图 11 实验装置示意图

Fig. 11 Diagram of experimental devices

图 12a 所示为无感电阻 R_n 两端的实验测量波形和计算电压波形,图 12b 所示为风电机组塔顶位置处的实验测量波形与计算电压波形。由图中的波形对比可发现,实验测量结果与电路模型计算结果吻合较好,验证本文所建风电机组暂态电路模型的准确性。

a. R_n 两端电压波形

b. 塔筒顶端位置电压波形

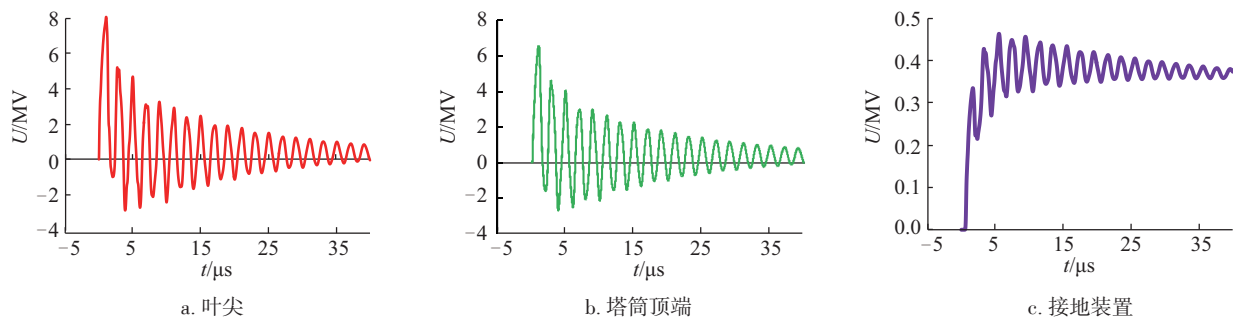
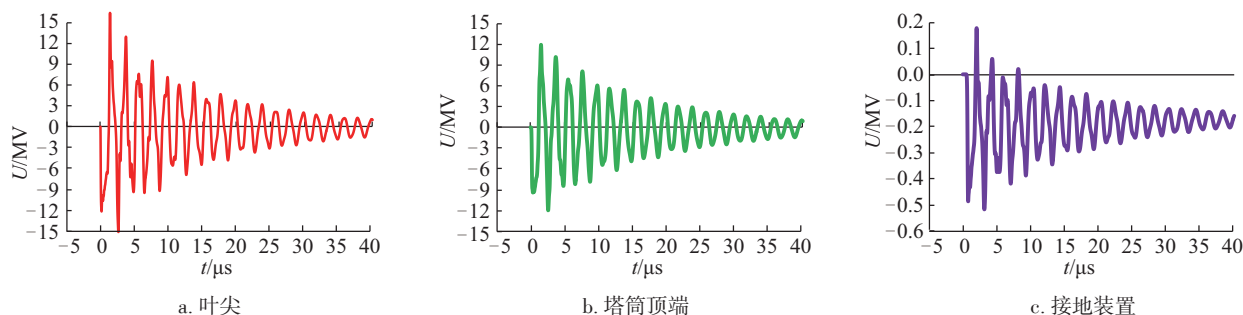
图 12 实验结果与仿真计算结果对比

Fig. 12 Comparison between experimental result and simulation result

3 仿真结果与分析

3.1 规程法计算的暂态过电压值及其幅值分布

以波形参数为 $+10/350 \mu\text{s}$ 和 $-1/200 \mu\text{s}$ 的 2 种雷电流分别作为风电机组的雷击注入电流,幅值选

图 14 “ $+10/350 \mu\text{s}$, 100 kA”雷电流下的暂态过电压波形Fig. 14 Transient overvoltage waveform of “ $+10/350 \mu\text{s}$, 100 kA” lightning current图 15 “ $-1/200 \mu\text{s}$, -50 kA”雷电流下的暂态过电压波形Fig. 15 Transient overvoltage waveform of “ $-1/200 \mu\text{s}$, -50 kA” lightning current

取为标准规程中规定的Ⅲ级雷电防护等级下的最大值,即 100 kA 和 -50 kA^[14]。图 13 为风电机组的主要几何尺寸及各导体部件实际位置的相对高度。

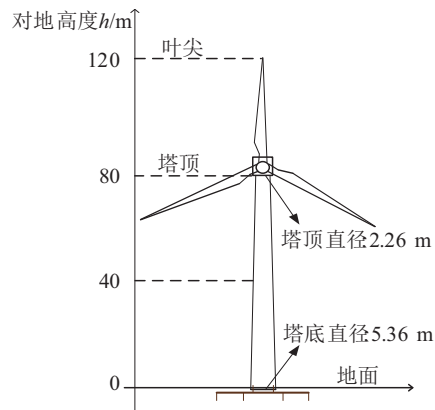


图 13 风电机组与地面高度的几何位置关系

Fig. 13 Geometric position relationship between wind turbines with height from ground level

通过规程法中的计算条件,可分别得到在固定雷电流幅值下的风电机组桨叶叶尖、塔筒顶端、接地装置等位置的暂态过电压波形,如图 14、图 15 所示。从图 14、图 15 中可见,在这 2 种雷电流激励下的暂态过电压波形皆具有明显的衰减振荡特征。振荡的主要原因来自于风电机组在雷电暂态过程

中呈现出的电感和电容特性。振荡的剧烈程度与雷电流的波头时间有关,波头时间越短,相应的振荡程度越大。虽然 $-1/200\text{ }\mu\text{s}$ 的雷电流幅值要小于 $+10/350\text{ }\mu\text{s}$ 的雷电流幅值,但前者所产生的暂态过电压幅值要大于后者。

为了便于考查雷电流波头陡度的影响,此处固定2种极性的雷电流幅值均为 50 kA ,则波头陡度分别取为 $50\text{ kA}/10\text{ }\mu\text{s}$ 和 $|-50\text{ kA}|/1\text{ }\mu\text{s}$ 。在此对比条件下,所得到的暂态过电压幅值 U_a 沿风电机组本体的分布如图16所示。

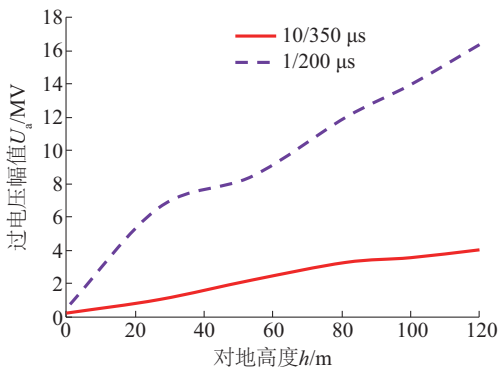


图16 $|\pm 50|\text{ kA}$ 雷电流下的暂态过电压幅值 U_a 分布
Fig. 16 Distribution of transient overvoltage peak values U_a under $|\pm 50|\text{ kA}$ lightning current

分析图16可知,暂态响应过电压的幅值既与雷电流幅值有关,又与雷电流陡度有关,且雷电流陡度影响较大。陡度越大,过电压幅值就越高。同时,过电压幅值的分布随着风电机组上各部位离地面高度的降低而降低,该规律适用于各种雷电流波形。

3.2 统计过电压值及其分布

利用暂态电路模型可得到各种雷电流幅值 I 下的暂态响应过电压幅值 $U_a(I)$ 。以 $+10/350\text{ }\mu\text{s}$ 雷电流波形为例,幅值 I 的取值范围为 $3\sim 200\text{ kA}$ (表1),通过式(3)计算,可绘制出概率加权过电压幅值 U_p 的分布图,如图17所示。

从图17可得到的分布特征为:1)在小于 37 kA 范围内,概率加权过电压幅值呈上升趋势,且上升斜率很大;2)当雷电流为 $37\sim 38\text{ kA}$ 时,过电压幅值达到最大值;3)在 $38\sim 200\text{ kA}$ 范围内,过电压幅值逐渐下降。雷电流波形为 $-1/200\text{ }\mu\text{s}$ 的分布特性曲线与图17类似,它们仅在过电压幅值的大小上有

所差别。

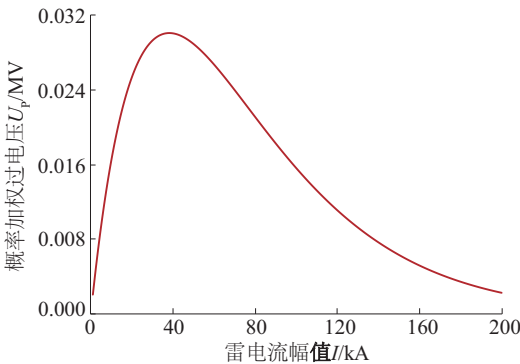


图17 概率加权过电压幅值 U_p
Fig. 17 Peak values U_p of probability weighted overvoltage

将概率加权过电压值按式(6)进行统计求和,可得到风电机组典型位置的统计过电压值,如表3所示。其分布规律可由图18直观体现。

表3 风电机组典型位置处的统计过电压值

Table. 3 Peak values of statistical overvoltage on typical positions of wind turbine

雷电流波形	雷电流幅值统计范围	统计过电压值 $ U_s /\text{MV}$		
		叶尖	塔顶	接地装置
$+10/350\text{ }\mu\text{s}$	$3\sim 200\text{ kA}$	3.0	2.4	0.17
$-1/200\text{ }\mu\text{s}$	$-3\sim -100\text{ kA}$	9.3	6.8	0.30

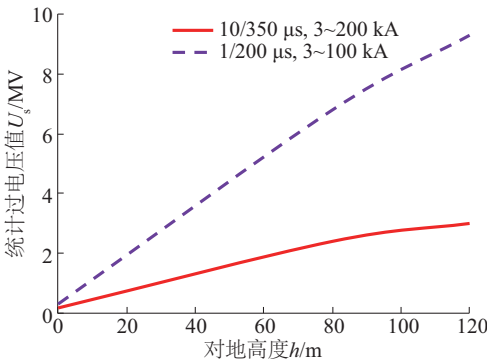


图18 不同雷电流幅值范围下的统计过电压值 U_s 分布
Fig. 18 Statistical overvoltage U_s distribution under peak value ranges of different lightning current

比较图16与图18,并由表3中数据可知,由概率统计算法得到的过电压统计值要明显小于由规程法计算得到的过电压值。同时还可看出,无论是规程法计算的过电压值,还是用概率统计算法得到的过电压统计值,它们在机组本体上的分布均随对

地高度的增加而呈现出升高的趋势。

4 结 论

本文建立风电机组的雷电暂态电路模型,该电路模型的计算结果能较好地与实验测量结果吻合。还从雷电流幅值的累积概率函数出发推导出计算风电机组上雷电暂态过电压统计值的概率加权算法。在选取首次短时间正雷击、首次短时间负雷击这 2 种雷电流波形后,分别采用标准规程法和概率加权算法对风电机组本体上的雷电暂态过电压进行计算。结果表明,在同样的雷电流波形条件下,风电机组上任意点处的过电压统计值明显低于规程法计算的过电压值,鉴于实际风电机组雷电暂态的随机性,这种差异在风电机组的防雷设计中应引起足够的重视。同时,在不同的雷电流波形条件下,雷电流的波头陡度对于暂态过电压影响较为显著,波头陡度越大,则过电压的统计值与规程法计算的过电压值均越高。就整体情况而言,过电压的统计值与规程法计算的过电压值沿风电机组本体的分布均表现出从雷击点开始自上而下逐渐减小的分布特性。

[参考文献]

- [1] 张小青. 风电机组防雷与接地[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [1] Zhang Xiaoqing. Lightning protection and grounding of wind turbine[M]. Beijing: China Electric Power, 2009.
- [2] 梁曦东, 周远翔, 曾 嵘. 高电压工程(第2版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015.
- [3] GB/T 50064—2014, 交流装置的过电压保护和绝缘配合设计规范[S].
- [4] IEEE Working Group on Lightning Performance of Transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1985, 85(3): 919—932.
- [5] Horvath T. Computation of lightning protection[M]. London: Research Studies Press, 2001.
- [6] Ларионов В. П. О возможностях расчета молниезащиты электрогеометрическим методом[J]. Электричество, 1992, (8): 14—15.
- [6] Lanionov B P. Using electrogeometric model to calculate the performance of lightning protection systems [J]. Electrical Technology Russia, 1992, (8): 14—15.
- [7] 罗日成, 李 稳, 李志前, 等. 基于分段参数的风力机组建模及雷击暂态过电压分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2780—2787.
- [7] Luo Richeng, Li Wen, Li Zhiqian, et al. Modeling of wind turbine generator based on piecewise parameter and its lightning transient overvoltage analysis[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2780—2787.
- [8] 肖 翔. 风电机组雷电过电压防护研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- [8] Xiao Xiang. Study on lightning overvoltage protection of wind turbines[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [9] Wu Hao, Zhang Li. Contrastive analysis of transient potential of wind turbine onshore and offshore in lightning strokes[C]. IEEE Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference[C], Chongqing, China, IEEE, 2015: 1206—1209.
- [10] Sheng Caiwang, Zhang Xiaoqing. Mathematical modeling of transient responses in a large scale multiconductor system[J]. Journal of Applied Mathematics, 2014, Suppl.: 484189—484195.
- [11] Yamamoto K, Noda T, Yokoyama S, et al. An experimental study of lightning overvoltages in wind turbine generation systems using a reduced-size model[J]. Electrical Engineering in Japan, 2007, 158(4): 22—30.
- [12] Radičević B M, Savić M S, Madsen S F, et al. Impact of wind turbine blade rotation on the lightning strike incidence- A theoretical and experimental study using a reduced-size model[J]. Energy, 2012, 45(1): 644—654.
- [13] GB 50057—94, 建筑物防雷设计规范(2000年版)[S].
- [14] GB/T 33629—2017, 风力发电机组-雷电防护[S].
- [15] 陶世祺, 张小青, 王耀武, 等. 直接雷击时风电机组的暂态响应分析[J]. 太阳能学报, 2017, 38(10): 2675—2682.
- [15] Tao Shiqi, Zhang Xiaoqing, Wang Yaowu, et al. Analysis of transient responses on wind turbines during direct lightning strike[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2017, 38(10): 2675—2682.
- [16] Zhang Xiaoqing, Liu Chenhua. Lightning transient simulation of wind turbine towers[J]. International Review of Electrical Engineering, 2012, 7(1): 3505—3511.
- [17] 张纬钺, 何金良, 高玉明. 过电压防护及绝缘配合[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [18] 张小青. 建筑物内电子设备的防雷保护[M]. 北京: 电子工业出版社, 2000.

- [18] Zhang Xiaoqing. Lightning protection of electronic equipment in the building [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2000.
- [19] Standler R B. Protection of electronic circuits from overvoltages [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1989, 68—69.
- [20] 肖翔. 风电机组雷电过电压防护研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- [20] Xiao Xiang. Study on lightning overvoltage protection of wind turbines [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [22] Paul C. Inductance: Loop and Partial [M]. Wiley-IEEE Press, 2010.
- [22] Kalantrof P L, Ceitlin L A. Manual of inductance calculation [M]. Moscow: Electric Power Press, 1992, 3—10.
- [23] Paolone M, Napolitano F, Borghetti A, et al. Models of wind-turbine main shaft bearings for the development of specific lightning protection systems [A]. Proceedings of 2007 IEEE Lausanne Power Tech [C], Lausanne, Switzerland, 2007, 783—789.
- [24] 尹健, 程鸿申. 电机用电刷静态接触电阻的研究 [J]. 碳素, 1991, (4): 23—28.
- [24] Ying Jian, Cheng Hongshen. Study of motor brush static contact resistance [J]. Carbon, 1991, (4): 23—28.
- [25] Iosseli A, Kothanof S, Stlyrski M G. Calculation of capacitances [M]. Moscow: Electric Power Press, 1987, 24—30.

STATISTICAL ANALYSIS OF LIGHTNING TRANSIENT OVERVOLTAGE ON WIND TURBINES

Tao Shiqi, Zhang Xiaoqing, Wang Yaowu, Su Mengmeng, Lin Yanhua

(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The incident of lightning striking to wind turbines (WTs) has an obvious randomness. Accordingly, the transient overvoltage caused by the lightning strike exhibits a random behavior and need to be calculated by employing the statistical analysis method. In order to meet this practical need, a statistical algorithm is proposed in this paper to calculate the transient overvoltage under positive and negative lightning strikes. The algorithm gives a probability weighting formula of the statistical overvoltage in terms of the probability density function of lightning current. Then, a complete circuit model is built for the WT by integrating the equivalent circuits of blade, bearing, tower and grounding system. The validity of the circuit model is verified by the reduced-scale experiment. On the basis of the circuit model and statistical algorithm, the statistical value of the transient overvoltage is obtained and its distribution along the WT body is further determined. The statistical overvoltage is also compared with the non-statistical one calculated from the technical specification to examine the difference between them.

Keywords: wind turbines; lightning; probability density function; statistical overvoltage; circuit model