

基于 EMTP-ATP 的风力发电机雷电电磁暂态特性分析

谢荣斌¹, 夏关荣¹, 李江涛², 郑敏军², 汪毅峰², 冯 欣²

(1. 贵州电网公司贵阳息烽供电局, 贵州 贵阳 551100;

2. 西安交通大学电气学院, 陕西 西安 710000)

摘 要:为解决风力发电机组雷电暂态过程研究的问题, 本文根据雷电流在风机系统内的流通路径, 利用 EMTP-ATP 软件建立了单台风机系统一体化电路暂态仿真模型以及整个风电场电路暂态模型, 分析了各部件模型的建立过程与模型中参数的计算方法。该模型将雷电流在风机系统内的传播路径立体地集成在一起, 反映雷电流在风机系统各部件内传播时的暂态特性。基于风机系统的一体化电路暂态模型, 研究了风机叶片、机舱、塔筒和变压器等部件的雷电暂态特性, 并分析了电缆屏蔽层接地方式等因素对风机雷电暂态特性的影响。研究表明塔筒-线芯间的过电压在线芯的上下两端达到最大; 电缆金属屏蔽层能有效降低塔筒-线芯间的感应过电压与线芯的雷电流, 感应过电压的抑制比可以达到 41%, 线芯雷电流抑制比可达 60%; 此外, 屏蔽层的接地方式采用两端接地时感应过电压幅值最小。

关键词: 风机; 过电压; 暂态模型; 电磁暂态; 屏蔽层

文章编号: 2096-4633(2019)08-0060-07 **中图分类号:** TM614 **文献标志码:** B

近年来, 风力发电技术不断发展, 随着风力发电机组的单机容量的不断扩大和风机整体高度的不断提升, 风机叶片作为单机结构中最高部位也更容易遭受雷击^[1-2]。国际电工委员会对欧美国家的风电场雷击故障率的统计结果显示, 在地闪密度较大的地方, 风机年平均故障率可高达 10%, 且大多数故障是由于雷击风机叶片引起的^[3]。与欧美国家相比, 我国风电场所处位置的地质和气候条件相对较为复杂, 风机遭受雷击的风险较大, 根据我国广东、内蒙、河北和东部沿海部分地区的调查结果, 我国运行风电机组的雷电事故损坏率高于欧洲国家的统计平均值。风电场频繁遭受雷击, 使得风力发电机组各部件故障率不断增加, 这不仅影响了电能的输送质量, 更带来了严重的经济损失。

雷电流在风机内传播的暂态过程中, 会在风机系统各部件上产生高幅值的暂态过电压, 严重威胁各设备的正常运行, 此外雷电流泄入大地时还会引起地电位抬升, 可能会对其他设备造成反击。目前对于风机的防雷保护依据主要参考国际电工委员会发布的通用标准。这种方法的好处是方便并且适用于大多数工况条件, 但是由于雷电现象的随机性与风机安装地域的差异性, 该方法常难以差异化的考

虑问题, 不能因地制宜地采取防雷措施, 使得防雷设计不能在技术经济上达到较优化的水平技术, 缺乏经济性的优化考虑以及不能定量计算雷击风机时产生的过电压, 这就会为风机机组的雷电电磁暂态保护设计带来一定困难^[4-8]。

目前国内外对风力发电机组雷电暂态过程及其防护已经进行了一系列的研究, 研究方法主要包括试验研究和理论研究两大类。试验研究是通过冲击电流发生器将冲击源注入风机模型或者风机叶片模型以模拟雷击风电机组过程^[9-12], 通过模拟雷击过程观察雷电过电压暂态过程的研究在世界上取得一定成果。虽然试验的方法是研究风电机组雷电暂态性能的有效的方法, 但是对实际风机的现场试验在测量实施上具有相当大的困难且费用高、工作历时长, 必须在风电机组建成后才可进行测试, 起不到及时指导工程设计的作用^[13-15]。因此, 对风力发电机组雷电暂态过程进行理论分析计算就显示出良好的可行性和必要性。

基于此, 本文着力分析风力发电机雷电电磁暂态特性, 包括风力发电机组雷电暂态效应模型研究, 建立包含风机叶片、塔筒、机舱和传输电缆的单台风机系统一体化电路暂态仿真模型以及有无电缆屏蔽

层以及屏蔽层接地方式对风力发电机防雷效果影响的研究。

1 风力发电机雷电暂态模型的建立

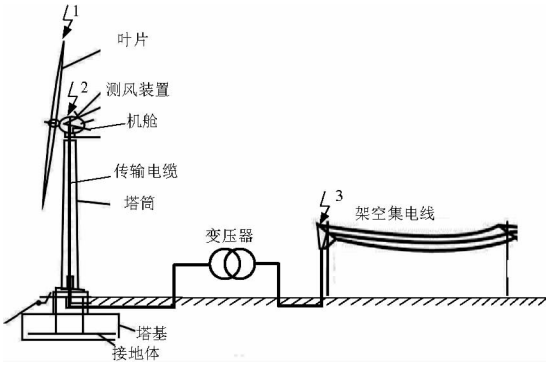


图1 单台风机电气结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the electrical structure of a single fan

单台风力发电机组主要由叶片、机舱、塔筒、输电电缆、变压器等部件组成,风机所产生的电能由升压变压器升压后,通常经过架空集电线并入电网。单台风机电气结构示意图如图1所示,雷电可能直接击中风力发电机本体的叶片和机舱,也可能击中集电线。当风力发电机本体受到雷击时,雷电流会通过风机本体泄散入大地,具体有两条泄流路径:第一条是雷击风机叶片时,雷电流通过叶片接闪器、引下线、轴承、塔筒、塔基接地装置泄散入大地;第二条是雷击中风机机舱时,雷电流通过机舱、轴承、塔筒、塔基接地装置泄散入大地。当雷电击中集电线时,雷电流会由变压器高压侧入侵风机系统。雷电流流经风力发电机组本体时,会使风力发电机组各装置产生幅值较高的暂态过电压,此过电压很难通过实验的方法测得,因此,在研究风力发电机雷击暂态特性时,关键工作是建立风力发电机组雷电暂态模型。故就风机叶片模型、机舱通路模型、塔筒模型、三相电缆模型的建模进行详细介绍。

1.1 风机叶片和机舱的等值模型

风机叶片是风机各结构中距离雷云最近的部分,因此最容易遭受雷击影响。风机叶片的结构可以近似为扁平的长条型。研究表明,当雷电流流过风机叶片时,叶片可以等效为一根具有一定半径的传输线^[16]。因此,风机叶片可以等效为多段 π 型RLC电路串联组成的等值电路,如图2所示,其中 R 为每段叶片的等效电阻, L 为每段叶片的等效电感,

C 为每段叶片的等效对地电容。RLC的数值可由式(1)、式(2)求得。

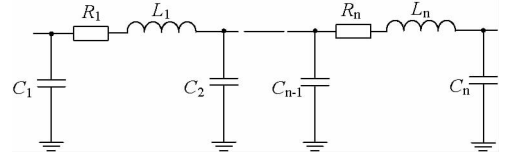


图2 风机叶片等值电路模型

Fig. 2 Equivalent circuit model of fan blade

$$Z = R + j\omega L = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{r}{\sqrt{l^2 + r^2} - l} \right) + r - \sqrt{l^2 + r^2} - \ln \left(\frac{\sqrt{r^2 + 4D^2}}{\sqrt{l^2 + r^2 + 4D^2} - l} \right) - \sqrt{r^2 + 4D^2} + \sqrt{r^2 + 4D^2 + l^2} \right] \quad (1)$$

$$D = h + \frac{2}{j\omega\mu_0/\rho}$$

$$C = \frac{l^2\mu_0\epsilon_0}{L} \quad (2)$$

式中: l 为叶片的轴向长度; r 为叶片的半径; h 为叶片中心对地高度; ρ 为大地土壤电阻率。

如图3所示,当雷击作用于风机叶片时,雷电流会由风机叶片内的导流通道流入机舱,通过机舱的主轴等部件流入风机塔筒,并最终注入大地。由于雷电流主要经主轴承流入塔筒,而流经其他部件的电流很小,因此可以通过对主轴承的建模来等效机舱内雷电流的路径。

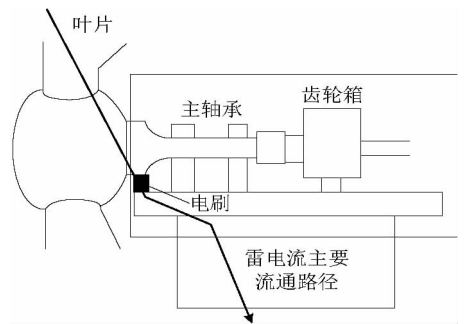


图3 雷电流在机舱内的流通路径

Fig. 3 Flow path of lightning current in the cabin

相关研究表明,当高幅值的雷电流流经风机的机舱内轴承时,轴承呈现明显的容性,因此舱内轴承在雷电暂态下可以用一等效电容 C_0 来表征,风机运行状态对这一电容值几乎没有影响。电刷在雷电暂态过程中可采用集中电阻 R_0 等效,且该电阻值在运行过程中是一个常数。因此风机机舱轴承在雷电磁暂态下可用电容与电阻的并联等效电路模拟,如

图 4 所示。

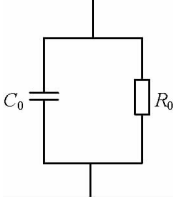


图 4 主轴承与电刷等效电路模型

Fig. 4 Equivalent circuit model of main bearing and brush

同时电容 C_0 和并联等效阻抗值应满足以下三个公式关系。

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon l}{1g(\beta + \sqrt{\beta^2 - 1})} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{D^2 - (r_1^2 + r_2^2)}{2r_1^2 r_2^2} \quad (4)$$

$$\left| \frac{1}{j\omega C_0 + 1/R_0} \right| < \frac{2\delta E_c}{l_m} \quad (5)$$

式中: ϵ 是润滑油的相对介电常数; l 为风机机舱轴承的长度; D 为滚子轴线与主轴承轴线间的距离; r_1 为滚子半径; r_2 为轴承环半径; d 为润滑油厚度; E_c 为润滑油介电强度; I_m 为雷电流峰值。

1.2 风机塔筒与三相电缆雷击暂态模型

现代风机塔筒的高度很高,雷电流在塔筒中传播时本质上是一个波过程,为了提高计算精度,需将塔筒分成若干段进行建模,每段最大允许长度取决于雷电波的上限截止频率。雷电流流经长导体时,导体沿线的波阻抗不是处处相等的,当雷电流流经半径为 3 cm,长度为 100 m 的铜质竖直圆柱导体时,导体沿线平均波阻抗 Z 的分布如图 5 所示。

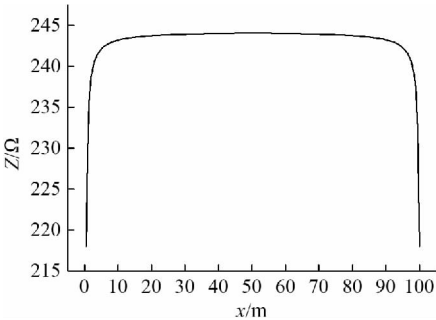


图 5 导体沿线平均波阻抗分布

Fig. 5 Average wave impedance distribution along the conductor

由图 5 可知,导体波阻抗在导体沿线呈现倒“U”形分布,即在导体中间部分,波阻抗几乎不变,但在导体的两端,波阻抗会发生较大的变化。为充

分考虑波阻抗在导体沿线分布不均对波传播过程的影响,塔筒不是均匀分段的,塔筒首末两端分段长度比塔筒中部分段长度更短。事实上,风电机组的塔筒是一个空心圆台体,但是由于每段塔筒上下圆截面的半径相差并不大,因此可将每段塔筒近似看作上下截面半径相等的空心圆柱体。实际风机每段塔筒上下大小的外形特点如图 6 所示。

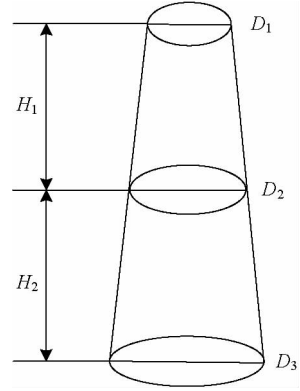


图 6 塔筒外形示意图

Fig. 6 Schematic diagram of tower shape

风力发电机每段塔筒的等效半径可按式(6)计算求得。

$$r_{eq} = \frac{D_1 H_2 + D_2 H + D_3 H_1}{2H} \quad (6)$$

式中: H 为每段塔筒的轴向长度; H_1 、 H_2 为每段塔筒中点距塔筒两端距离,即 H 的一半; D_1 、 D_2 、 D_3 分别为每段塔筒顶端截面、中点截面、底端截面的外直径; r_{eq} 为每段塔筒的等效外半径。

每一段塔筒的电阻 R_i 、等效电感 L_i 以及对地分布电容 C_i 可由式(7)~式(9)计算得出。

$$R_i = \rho \frac{H}{A_i} \quad (7)$$

$$L_i = \frac{\mu_0 H}{2\pi} \left(\ln \frac{2H}{r_{eq}} - 1 - \frac{\mu}{\mu_0} \ln c \right) \quad (8)$$

$$C_i = \frac{H^2 \epsilon_0 \mu_0}{L_i} \quad (9)$$

式中: ρ 为塔筒电阻率; H 为每段塔筒的长度; A_i 为第 i 段塔筒的截面积; μ 为介质的绝对磁导率; c 为由塔筒内半径 r_{in} 与外半径 r_{out} 之比所确定的参数。

塔筒内电缆平行于塔筒敷设,电缆与塔筒之间存在一定大小的耦合电容,当雷电流流经塔筒时,电缆上感应出的过电压可能会超出其绝缘水平。目前大多学者所建立的电缆模型是单相电缆模型,并不

符合实际情况的三相电缆。

本文建立塔筒和三相电缆耦合模型,来更精确地反应风机塔筒内雷电过电压特性,塔筒-三相电缆模型如图6所示, C_{01} 为塔筒对地电容, R_1 为塔筒电阻, L_1 为塔筒电感, C_{11} 为塔筒与电缆屏蔽层间的耦合电容, R_2 为电缆屏蔽层的电阻, L_2 为电缆屏蔽层电感, C_{21} 为电缆线芯对屏蔽层间等效电容, C_{31} 为电缆相间等效电容, R_3 为电缆线芯电阻, L_3 为电缆线芯电感。

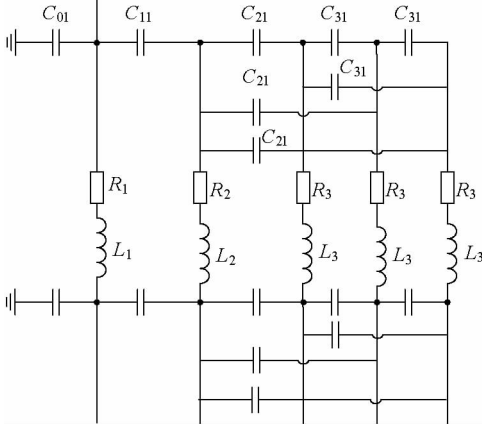


图7 塔筒-三相电缆模型

Fig.7 Cable model of tower-three-phase

塔筒与电缆芯线间的电容 C_{11} 可由式(10)计算得出。

$$C_{11} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r l}{\cosh^{-1}\left(\frac{r_{eq}^2 + r_3^2 - d_{12}^2}{2r_{eq}r_3}\right)} \quad (10)$$

式中: l 为导线长度; r 为每段塔筒的等效半径; r_3 为电缆外半径; d_{12} 为电缆与塔筒的间距。

电缆线芯与电缆屏蔽层间的电容可由式(11)计算得出。

$$C_{21} = \frac{24.13\epsilon_r}{\lg \frac{D_{23}}{r_1}} \quad (11)$$

式中: D_{23} 为电缆线芯与电缆屏蔽层间的距离; r_1 为电缆线芯内径。

电缆芯线之间的电容可由式(12)计算得出。

$$C_{31} = \frac{\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln \frac{S + \sqrt{S^2 - 4r_1^2}}{2r_1}} \quad (12)$$

式中: S 为单芯电缆中心之间的距离; r_1 为电缆线芯内径。

2 风机雷电电磁暂态特性

为了研究三相电缆屏蔽层对风力发电机雷电暂态特性的影响,在仿真中设定输入雷电流幅值为100 kA,波形参数为2.6/50 μ s。对比三相电缆分别在有无屏蔽层的情况下屏蔽层-线芯间的电压差与塔筒-线芯间的电压差,结果如图8所示。

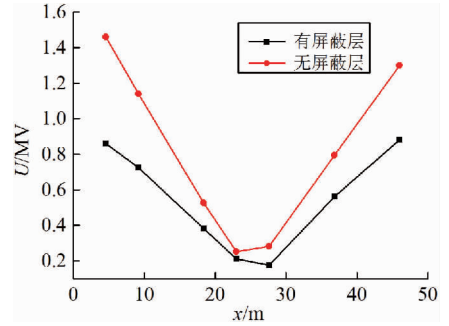


图8 屏蔽层-线芯以及塔筒-线芯间的电压差

Fig.8 Voltage difference between shield layer-wire core and tower-wire core

由图8可以看出,在风电机组遭受雷击的过程中,三相电缆线芯-塔筒、三相电缆线芯-电缆屏蔽层间的电位差在不同位置是不同的:在传输线中间部位电位差最小,在传输线上下两端的电位差达到最大,这与风机在实际运行中机舱以及塔底控制箱易遭受雷击而损坏相对应。为三相电缆添加屏蔽层对雷电过电压有明显的抑制作用,在电缆末端,雷电过电压的抑制比可以达到41%,限压抑制效果显著,所以实际情况中电缆一般都需要有电缆屏蔽层。

三相电缆分别有无屏蔽层时电缆线芯的雷电流感应电流如图9、图10所示,屏蔽层能较好的限制芯线上的耦合雷电流,线芯雷电流抑制比可达60%。屏蔽层存在时,感应电流的震荡比没有屏蔽层时剧烈,这是由于屏蔽层的存在,电缆线芯对屏蔽层会有耦合电容,耦合电容的存在增加了波形震荡的频率。

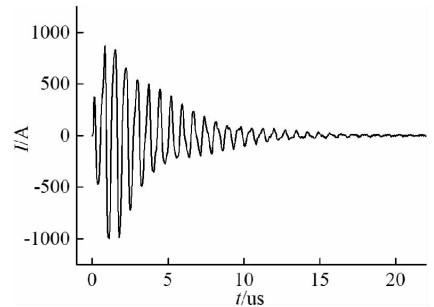


图9 无屏蔽层时电缆线芯电流

Fig.9 Cable core current without shielding

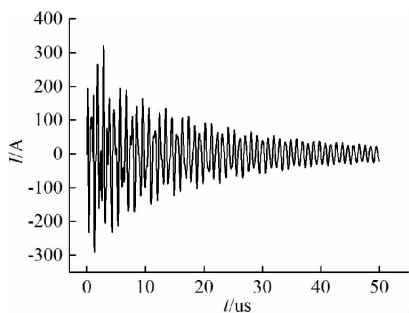


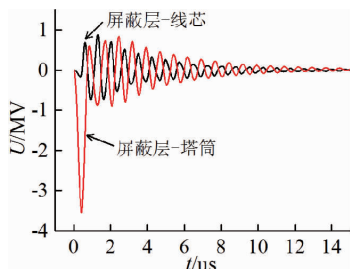
图 10 有屏蔽层时电缆线芯电流

Fig. 10 Cable core current with shielding layer

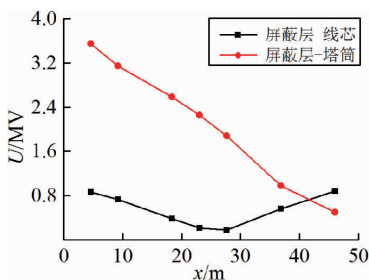
通常情况下,屏蔽层的接地方式会影响脉冲电磁场的衰减振荡特性。保持雷电流参数不变,在电缆空载的情况下计算屏蔽层在不同接地方式时的感应电压。

2.1 电缆屏蔽层顶端开路,底端接地。

这种情况下屏蔽层-线芯间的电压、屏蔽层-塔筒间的电压波形以及幅值差如图 11 所示。屏蔽层-塔筒间的电压的幅值高达数 MV,很可能高于绝缘安全阈值,此时就需要采取必要的雷电过电压保护措施。随着测量点高度 x 的增加,屏蔽层-电缆芯线电位差呈现先下降后上升的“V”字型分布,在塔筒的中点处电位差幅值最小;然而随着测量点高度 x 的增加,屏蔽层-塔筒间的电位差逐渐减小,即在塔筒顶端电位差幅值最小。



(a) 电压波形



(b) 电压幅值差

图 11 电缆屏蔽层底端接地

Fig. 11 Grounding at bottom of cable shielding layer

2.2 电缆屏蔽层顶端接地,底端开路。

这种情况下屏蔽层-线芯间的电压、屏蔽层-塔筒间的电压波形幅值差如图 12 所示,这种情况下雷电暂态特性与电缆屏蔽层顶端开路、底端接地情况下类似。

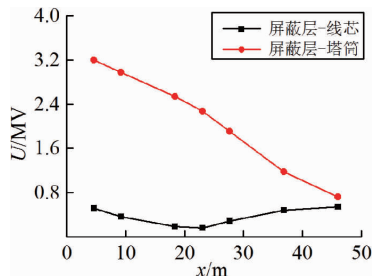
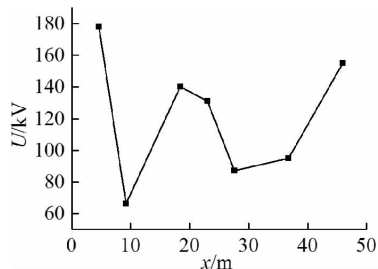


图 12 电缆屏蔽层顶端接地电压幅值差

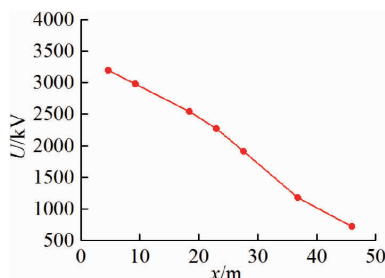
Fig. 12 Amplitude difference of grounding voltage at top of cable shielding layer

2.3 电缆屏蔽层两端接地。

这种情况下屏蔽层-线芯间的电压、屏蔽层-塔筒间的电压波形以及幅值差如图 13 所示。



(a) 屏蔽层-线芯电压幅值差



(b) 屏蔽层-塔筒电压幅值差

图 13 电缆屏蔽层底端接地

Fig. 13 Grounding at bottom of cable shielding layer

随着测量点高度 x 的增加,屏蔽层与塔筒间的电位差是单调递减的;而屏蔽层-芯线间的电位差则不同,这是因为屏蔽层两端接地,从两个接地端看进去,电位差都应该整体上是先减小后增大的特点,如图 13(a)所呈现的“W”形状。电缆屏蔽层两端接地时,屏蔽层与线芯间的电压、屏蔽层-塔筒间的电压比电缆屏蔽层单端接地时小,因此实际运行中推

荐屏蔽层采用两端接地方式。

3 结论

本文建立了风力发电机的雷电暂态仿真模型,并通过 EMTP-ATP 对风机遭受雷击时暂态过程进行仿真计算。计算结果表明,塔筒-线芯间的过电压在线芯的上下两端达到最大,传输电缆添加屏蔽层对雷电过电压有明显的抑制作用,在电缆末端,雷电过电压的抑制比可以达到 41%;屏蔽层同时能较好的限制芯线上的耦合雷电流,线芯雷电流抑制比可达 60%。屏蔽层的接地方式对感应过电压的分布有较大影响:电缆屏蔽层两端接地时,屏蔽层与线芯间的电压、屏蔽层与塔筒间的电压比电缆屏蔽层单端接地时小,因此实际运行推荐屏蔽层两端接地运行方式。

参考文献:

- [1] GAROLERA A C, MADSEN S F, NISSIM M, et al. Lightning damage to wind turbine blades from wind farms in the U.S [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(03): 1043-1049.
- [2] YE QING WANG, WEI FEI HU. Investigation of the effects of receptors on the lightning strike protection of wind turbine blades [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2017, 59(04): 1180-1187.
- [3] 史家洋. SVG 在风力发电系统中的应用 [J]. 电力大数据, 2018, 5(21): 47-51.
SHI Jiayang. Application of SVG in wind power systems [J]. Power Systems and Big Data, 2018, 21(05): 47-51.
- [4] GAROLERA A C, MADSEN S F, NISSIM M, et al. Lightning Damage to Wind Turbine Blades from Wind Farms in the US [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(03): 1043-1049.
- [5] SALDANHA PAULINO J. O, FONSECA BARBOSA C, LOPES I. J. S, et al. Indirect lightning performance of aerial distribution lines considering the induced-voltage waveform [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2015, 57(05): 1123-1131.
- [6] PETERSON M, LIU C. Models of wind-turbine main shaft bearings for the development of specific Lightning Protection Systems [J]. IEEE Transactions on electromagnetic compatibility, 2011, 53(01): 99-107.
- [7] SMORGONSKIY A, RACHIDI F, RUBINSTEIN M, et al. Are standardized lightning current waveforms suitable for aircraft and wind turbine blades made of composite materials? [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2017, 59(04): 1320-1328.
- [8] NAPOLITANO F, PAOLONE M, BORGHETTI A, et al. Models of wind-turbine main-shaft bearings for the development of specific

lightning protection systems [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2011, 53(01): 99-107.

- [9] BABA Y, RAKOV V A. Applications of the FDTD method to lightning electromagnetic pulse and surge simulations [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2014, 56(06): 1506-1521.
- [10] YANG W, TAVNER P J, CRABTREE C J, et al. Wind turbine condition monitoring: technical and commercial challenges [J]. Wind Energy, 2014, 17(05): 673-693.
- [11] 成林, 孔志战, 王森, 等. 雷电流对杆塔接地装置冲击特性影响规律的研究 [J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(04): 53-58.
CHENG Lin, KONG Zhizhan, WANG Sen, et al. Influence of lightning current on impulse characteristic of ground device of pole and tower [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(04): 53-58.
- [12] 肖翔, 张小青, 李聪. 风电机组雷电过电压的仿真分析 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(24): 237-244.
XIAO Xiang, ZHANG Xiaoqing, LI Cong. Simulation analysis on overvoltage in wind turbines by lightning stroke [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(24): 237-244.
- [13] HOERAUF R. Considerations in Wind Farm Grounding Designs [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(02): 1348-1355.
- [14] 李显强, 王建国, 王宇, 等. 风电场电缆集电系统雷电暂态数值计算 [J]. 高电压技术, 2015, 41(05): 1566-1573.
LIXianqiang, WANG Jianguo, WANG Yu, et al. Lightning transient numerical calculation of cable power collection system in wind power plant [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(05): 1566-1573.
- [15] KALISKI K, LOZUPONE D, MCPHEE P, et al. Massachusetts wind turbine acoustics research project—goals and preliminary results [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2014, 136(04): 2203-2204.
- [16] 陶世祺, 张小青, 王耀武, 等. 考虑后续雷击的风电机组雷电暂态研究 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(18): 5326-5334.
TAO Shiqi, ZHANG Xiaoqing, WANG Yaowu, et al. Research of lightning transient responses on wind turbines during subsequent lightning strike [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(18): 5326-5334.

收稿日期: 2019-05-30

作者简介:



谢荣斌(1970),男,高级工程师,工程硕士,主要从事高电压技术研究与管理工。

(本文责任编辑:范斌)

Analysis of lightning electromagnetic transient characteristics for wind-driven generator based on EMTP – ATP

XIE Rongbin¹, XIA Guangrong¹, LI Jiangtao², ZHENG Minjun², WANG Yifeng², FENG Xin²

(1. Guiyang Xifeng Power Supply Bureau of Guizhou Power Grid Co. ,Ltd. ,Guiyang 551100 Guizhou, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710000Shaanxi, China)

Abstract: In order to solve the problem of lightning transient process research of wind turbines, based on the circulation path of lightning current in the fan system, the transient simulation model of the integrated circuit of the single fan system and the transient model of the whole wind farm circuit are established by using EMTP – ATP software. The establishment process of each component model and the calculation method of parameters in the model are analyzed. The model can stereoscopically integrate the propagation path of lightning current within the fan system to reflect the transient characteristics of the lightning current propagating within various components of the fan system. Based on the transient circuit model of the integrated circuit of the fan system, the transient characteristics of the wind turbine blades, the nacelle, the tower barrel and the transformer are studied and the influence of the cable shielding grounding method on the transient characteristics of the wind turbine is analyzed. The results show that the overvoltage between the tower barrel and the core reaches the maximum at both ends of the core; the metal shield layer of cable can effectively reduce the induced overvoltage and the lightning current between the tower barrel and the core. The suppression ratio of the induced overvoltage can reach 41%, and the lightning current suppression ratio of the core can reach 60%. In addition, the grounding method of the shielding layer adopts the minimum amplitude of induced overvoltage when grounding at both ends.

Key words: wind turbine; overvoltage; transient model; electromagnetic transient; shielding layer