

天线阵列雷击风险评估与保护方案研究

童雪芳, 文习山, 鲁海亮

(武汉大学电气工程学院高压教研室, 武汉 430072)

摘要: 为评估设备信息系统的雷击风险, 提出了一套计算天线阵列受到直击雷、绕击雷和感应雷等3种情况下雷击损坏次数和雷击损坏概率的方法, 直击雷计算直接采用《建筑物防雷设计规范》(GB50057—1994)中的算法, 绕击雷借用输电线路的计算方法, 感应雷则通过计算雷电电磁场来算出感应电压。依据该法借助ATP仿真软件评估了某通信基站天线阵列的雷击风险, 并给出了一套3级保护方案。

关键词: 天线阵列; 雷击损坏概率; 评估; 保护; 方案

中图分类号: TM863 文献标识码: A 文章编号: 1003-6520(2006)04-0028-03

Study on Lightning Strike Risk Evaluation and Protection Scheme of Antennae Array

TONG Xuefang, WEN Xishan, LU Hailiang

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: This article presents a method, which can be used to evaluate the risk of lightning strike on equipment information systems, to calculate the stroke-incidence rate under the condition of direct lightning strike, shielding failure and indirect lightning strike for antennae array. The calculation of direct lightning strike directly adopt the method introduced in the «Design code for protection of structures against lightning»(GB50057-1994). The calculation of shielding failure uses the method integrating the Electro-geometric Model (EGM) and the Alternative Transients Program (ATP) simulation analysis, regarding the outside line of antennas as a ground wire. To evaluate the stroke-incidence rate under the condition of indirect lightning, the inductive voltage should be worked out first. The electromagnetic field produced by return strike of lightning is used to gain the value in this article. The ATP simulation analysis is still used then to get the last stroke-incidence rate. The method has been used for an actual antenna array system to design a three-step protection project, which has worked successfully and has been listed in the article.

Key words: antennae array; stroke-incidence rate; evaluation; protection; scheme

0 引言

雷击的热、机械、电动力、冲击波、电磁场、静电感应等效应极大地威胁着建(构)筑物、微电子设备和人身的安全^[1-3]。随着各种现代计算机通信网络、信息设备系统的建立, 雷击灾害造成的经济损失和社会影响逐年增大。从雷电防护的角度看, 设备集成化、小型化、高速化的必然结果是使各种电子设备耐过压、耐电流和抗雷电电磁脉冲的能力大大降低。天线阵列对雷电电磁脉冲有很强的耦合作用, 且下接电子设备, 故其防雷保护非常重要。本文研究设备信息系统天线阵列雷击风险评估的方法, 并给出一种3级保护的防雷设计方案。

1 雷击风险评估

1.1 直击雷计算

按标准^[4]规定的直击雷计算方法, 可将天线阵列(见图1)等效为一建筑物。设 l 、 w 、 h_b 分别为建筑物的长、宽、高, m ; t_a 为年平均雷暴日数; k_c 为校正系数, 则建筑物等效面积 $A_e = (lw + 2(l+w) \cdot \sqrt{h_b(200-h_b)} + \pi h_b(200-h_b)) \times 10^{-6}$ (km^2); 雷击

大地年平均密度 $N_g = 0.024t_a^{1.3}$ (次/ $\text{km}^2 \text{a}$); 年预计雷击次数 $N = k_c N_g A_e$ (次/a)。

然后借助ATP仿真软件可得在各种保护下系统至少有一个设备损坏时所对应的临界直击雷电流 I , 根据 $\lg P = -I/88$ 可得系统受直击雷而损坏的概率 P , 而雷直击避雷针时则天线受到感应雷作用。

1.2 绕击雷计算

标准^[5]规定的绕击雷一般计算方法是: 平原线路 $\lg P_o = \alpha \sqrt{h_t}/86 - 3.9$, 山区线路 $\lg P_o = \alpha \sqrt{h_t}/86 - 3.35$, 其中 P_o 为绕击率, α 为避雷线保护角, h_t 为杆塔高度。此法认为 P_o 与雷击无关, 对山坡倾角 θ 的影响只以平原和山区区分, 这只是简单计算法, 准确度不太高。近年提出的电气几何模型法(EGM)^[6-9]认为 P_o 与最大绕击雷电流幅值 I_{sm} 相关, 并考虑了避雷线高度 h_g 、导线高度 h_c 、地形等因素的影响, 其结果与二三十年的运行经验基本符合; I_{sm} 大到一定程度时雷电或击中避雷线, 或击中大地, 不再绕击, 该法正是通过最大击距 r_{sm} 求出 I_{sm} 。天线阵列(见图1)边缘一列顶端连线可视为输电线, 外侧一列避雷针顶连线可近似为一根避雷线。则由 EGM 法可得

$$r_{sm} = (h_g + h_c)(1 - \sin(\alpha + \theta))/2 < (h_g + h_c)/2 < h_g$$

再由 $r_{sm} = 7.1 I_{sm}^{0.75}$ 可得 I_{sm} ; 然后同样借助 ATP 仿真软件可得在此 I_{sm} 及各种保护下的系统状态。

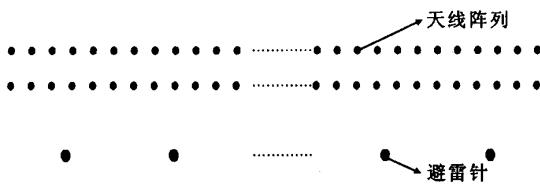


图1 天线阵列示意图

Fig. 1 Geometry sketch map the antennae array

1.3 感应雷的计算

首先应通过求解雷电流 i 产生的电磁场来计算感应电压 U 。 i (通道见图 2) 模型的选取: 设 i 一级级垂直向上传播, 幅值 I_0 保持不变, 传播速度 $v = 0.1G$ m/s, 雷云距地面高度为 H , 则 i 贯穿雷云与地之间通道所需的时间为 H/v ; 设 i 产生的电磁场不受任何干扰地传到天线阵列处, 且大地电导率为理想情况, 不影响该磁场。实际情况是电磁场在空间传播时会不断衰减, 且大地电导率会畸变雷电电磁场^[10], 因而此假设下的计算结果应偏向保守。

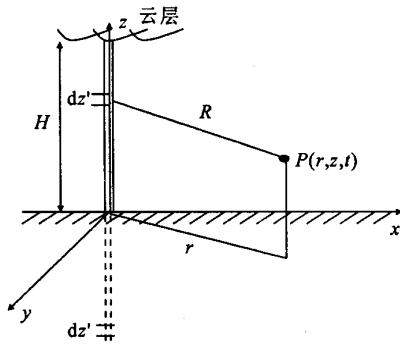


图2 雷电流通道示意图

Fig. 2 Geometry showing the lightning return stroke channel

$u(t)$ 为单位阶跃函数, ρ_i 为电荷密度幅值, x 、 y 、 z 为笛卡尔坐标轴, z' 为 z 轴上某点, τ 为时间 t 轴上某点, 通道中任一点的电荷密度 $\rho(z', t) = \rho_i \cdot u(t - z'/v)$, 沿通道任一点的雷电流瞬时值为 $i(z', t)$, 且 $\partial i(z', t)/\partial z + \partial \rho(z', t)/\partial t = 0$, 则 $i(z', t) = I_0 u(t - z'/v)$ 。

令 $R = \sqrt{r^2 + (z' - z)^2}$, 则 i 在距雷击点 r 处产生的电场强度 E 可分解为水平电场 $E_r(r, z, t)$ 和垂直电场 $E_z(r, z, t)$ ^[11-14]:

$$E_z(r, z, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{-H}^H \left(\frac{2(z - z')^2 - r^2}{R^5} \int_0^t i(z', \tau - \frac{R}{c}) d\tau + \frac{((2(z - z')^2 - r^2)/cR^4) i(z', t - R/c)}{c} \right) dz' - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{-H}^H \frac{r^2}{c^2 R^3} \frac{\partial i(z', t - R/c)}{\partial t} dz',$$

$$E_r(r, z, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{-H}^H \left(\frac{3r(z - z')}{R^5} \int_0^t i(z', \tau - \frac{R}{c}) d\tau + \frac{(3r(z - z')/cR^4) i(z', t - R/c)}{c} \right) dz' +$$

$$(3r(z - z')/cR^4) i(z', t - R/c) + \frac{r(z - z')}{c^2 R^3} \frac{\partial i(z', t - R/c)}{\partial t} dz'.$$

通常天线对地高度 $H_0 \ll H$, 天线上每点的电场强度可看作相等, 且均等于高度为 0(即 $z = 0$) 处的场强。则天线处的垂直场强为

$$E_z(r, 0, t) = \frac{I_0}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{-th + (2h^2 + r^2)/v}{(h^2 + r^2)^{3/2}} - \frac{1}{rv} - \frac{r^2/(c^2(h^2 + r^2)^{3/2}(1/v + h/c\sqrt{h^2 + r^2}))}{\dots} \right),$$

其中 $h = k(ct - \sqrt{(kct)^2 + r^2(1 - k^2)})/(1 - k^2)$, c 为光速, $k = v/c$ 。则天线顶部的感应电压为

$$U = - \int_0^{H_0} E_z(r, z, t) dz \approx - H_0 E_z(r, 0, t).$$

可见 I_0 一定时 U 是 r 和 t 的函数。 r 一定时 U 就是 t 的函数, i 贯穿电流通道时刻, U 的值近似为最大值 U_m , 这样便可得到不同 r 处的 U_m 。

然后借助 ATP 软件可得在不同保护下系统所能承受的 U_m , 此电压限值在雷击点距天线不同 r 处对应不同 I_0 , 从而可得 I_0 和 r 的一系列数据对, 通过曲线拟合即可得各种保护下, I_0 和 r 的关系曲线及其表达式 $I_0(r)$ 。

各种保护下感应雷损坏设备的雷击次数为

$$N = \int_{r=r_0+1.5h_a}^{\infty} N_g \times 10^{-I_0(r-r_0)/88} dS = \int_{1.5h_a}^{\infty} N_g \times 10^{-I_0(r)/88} \times 2\pi r \times 10^{-6} dr \text{ (次/a)},$$

其中积分下限中 r_0 为天线阵列等效成圆形时的半径, h_a 为避雷针高度, $1.5h_a$ 为根据国标^[4]计算出的避雷针在大地平面上的保护范围。

2 实例研究与保护方案的确定

2.1 计算模型及参数的选择

依据标准^[4]的规定, 对已知通信基站按二类防雷等级设计, 采用 3 级保护方式: 第 1、2 级均采用 LGF 放电间隙保护, 只是参数不同, LGF-1、LGF-2 的最大放电电流分别为 60、20 kA, 保护水平分别为 4、0.6 kV, 响应速度均为 100 ns, 极间电阻均为 6 MΩ, 极间电容均为 10 pF; 第 3 级采用信号保护器, 它由 LGF-3、小电阻 R_0 和瞬态电压抑制器 (TVS) 构成, LGF-3 的最大放电电流为 5 kA, 保护水平为 70V, 极间电阻为 10 MΩ, 极间电容为 10 pF, $R_0 = 1 \Omega$, TVS 击穿电压为 5 V, 最大导通电流为 120 A。 I 和 U 的波形设为一致, 分 2.6/50 μs 和 10/350 μs 两种情况考虑。

天线上受直击雷、感应雷时的等值电路图分别见图 3、4, 两者的不同在于: 前者 I 通过雷电流通道电阻(取 500 Ω)直接接在网络中; 后者 U 通过天线

对地电容 $C = 2\pi\epsilon_0 l_x / \ln(l_x/r_x)$ 传到后续设备上, 空气介电常数 $\epsilon_0 = 10^{-6} / 36\pi (F/km)$ 、天线长度 $l_x = 6$ m、天线杆半径 $r_x = 35$ mm 代入算得 $C = 64.8$ pF。

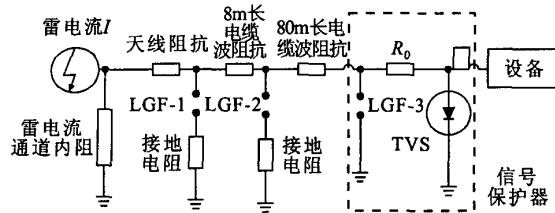


图3 受直击雷时的等值电路图

Fig. 3 Equivalent circuit of the antennae excited by direct lightning

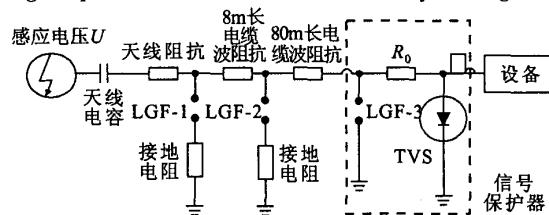


图4 受感应雷时的等值电路图

Fig. 4 Equivalent circuit of the antennae excited by indirect lightning

2.2 仿真计算结果及分析

对绕击雷, $I_{sn} < 1.8$ kA。经 ATP^[16]仿真验证, 有3级保护时如此大小的直击雷对系统无影响。

对感应雷, 有3级保护时拟合曲线表达式为

$$I_0(r) = 0.3r^2 - 2.6r + 40960.6。$$

则 $N = \int_{r=245+16.5}^{\infty} 10^{-I_0(r-245)/88} N_g dS = \int_{16.5}^{\infty} N_g \times 2\pi r \times 10^{-(0.3r^2 - 2.6r + 40960.6)/88} \times 10^{-6} dr \approx 0$ (次/a)。

因雷击点与天线的距离>5 km 后天线上的感应雷较小, 故取方圆 5 km 范围内计算感应雷即可。面积 $S = \pi r^2 = \pi \times 5^2 = 78.5$ (km²) 的范围内年落雷次数约为 $N_g S = 156.9$ 次/a, 则此时系统受到方圆 5 km 范围内的感应雷而损坏的概率为 0/156.9=0。

取 $t_d = 30$ 、 $k_c = 1.7$ 时两种雷电流波形下的雷击次数综合仿真计算结果见表 1。

表1 雷击次数计算结果

Tab. 1 Results of the number of getting lightning strike

雷击种类	年雷击损坏次数 N, 雷击损坏概率 P	
	无或有前两级保护	有3级保护
2.6/50 μs	直击雷 0.6378, 100%	0.5350, 83.88%
	感应雷 126.6, 80.7%	0, 0
10/350 μs	直击雷 0.6378, 100%	0.5460, 85.61%
	感应雷 116.8, 74.4%	0, 0

只有两级保护时 $P=100\%$ 的原因是雷电压较低(<2 kV)时两个保护间隙均不动作, 设备(耐压仅 6 V)直接受雷电压作用而损坏; 雷电压较高时, 可能有一或两个保护间隙动作, 但间隙接地电阻的存在会使设备因残压仍超耐压而损坏。

由表数据见, 不装或只装前两级保护时, 天线阵

列受直击雷和感应雷而使后续设备损坏的概率都很大, 虽然直击雷的 N 不大, 但感应雷的 N 却很大, 这是不允许的, 因而不装或只装前两级保护是不合适的。但装有 3 级保护时, 直击雷的 N 进一步减小, 在规程允许范围内; 感应雷的 N 则几乎为 0, 充分说明 3 级保护很有必要, 且本文所取的 3 级保护参数也较合适, 既满足技术要求, 又比较经济实用。

ATP 的仿真发现, 当直击雷或感应雷大于系统所能承受的条件时放电间隙 LGF-3 首先损坏, 因而要想进一步提高整体的保护性能, 应适当加强 LGF-3 的保护性能, 如增加其放电电流等。

3 结语

本文借助 ATP 软件计算了直击雷、绕击雷、感应雷的年雷击损坏次数和雷击损坏概率, 基于计算结果给出了一种 3 级保护的防雷方案, 该方案已通过验收, 并成功应用于某大型天线阵列的防雷保护中。本文的方法也可应用于普通设备信息系统的雷击风险评估和防雷设计中。

参 考 文 献

- [1] 周文俊, 王继业, 张洪义, 等. 常用通信接口芯片过电压耐受能力[J]. 高电压技术, 2001, 27(4): 41-56.
- [2] 李锐海. 电子设备的防雷及防电磁干扰[J]. 云南电力技术, 1998, 26(2): 8-11.
- [3] 贺庚媛. 计算机系统的雷电防护[J]. 计算机工程与应用, 1997, (3): 50-52, 42.
- [4] GB50057-1994, 建筑物防雷设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 1994.
- [5] DL/T620-1997, 交流电气装置过电压保护与绝缘配合[S]. 北京: 中国电力出版社, 1997.
- [6] 陈维贤. 电网过电压教程[M]. 北京: 中国电力出版社, 1996.
- [7] 谭洪恩, 刘波, 张新明. 山区 220 kV 线路雷电反击与绕击分析[J]. 华中电力, 2000, 6(13): 33-36.
- [8] 王晓瑜. 几种雷电屏蔽分析模型物理基础的研究[J]. 高电压技术, 1994, 20(1): 12-16.
- [9] 王晓彤, 施国, 刘文泉. 改进电气几何模型计算输电线路绕击率[J]. 高电压技术, 1998, 24(1): 85-87.
- [10] Kannu P Durai, Joy Thomas M. Influence of ground conductivity on the over voltages induced on overhead power distribution lines due to an indirect lightning stroke[J]. 2000 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, [S. L.], 2000: 949-954.
- [11] Nucci C A, Rachidi F, Lancz M V, et al. Lightning-induced voltages on overhead lines[J]. IEEE Trans on Electromagnetic Compatibility, 1993, 35(1): 75-86.
- [12] Lupo G, Petrarcia C, Tucci V, et al. EM fields generated by lightning channels with arbitrary location and slope[J]. IEEE Trans on Electromagnetic Compatibility, 2000, 42(1): 39-53.
- [13] Farhad Rachidi, Marcos Rubinstein, Silvia Guerrieri, et al. Voltages induced on overhead lines by dart leaders and subsequent return strokes in natural and rocket-triggered lightning[J]. IEEE Trans on Electromagnetic Compatibility, 1997, 39(2): 160-166.
- [14] 田明宏, 宋松林, 魏明, 等. 基于 DU 模型雷电回击电磁场的计算[J]. 高电压技术, 2002, 28(9): 34-36.
- [15] 薛大林, 孟祥敏. 用等效电荷法近似计算棒形导体的电容[J]. 电力学报, 2003, 18(1): 8-10.
- [16] László Prikler, Hans Kristian Høidalen. ATPDRAW User' Manual, version 3.5[R]. [S. L.]: SINTEF Energy Research (SEFAS), 2002.

童雪芳 1982—, 硕士生, 从事电力系统过电压及防雷方面的研究。电话: (027)68772283-315; E-mail: txfang82@163.com

文习山 1962—, 博士, 教授, 博导, 从事高电压技术及绝缘方面的研究。电话: (027)68772283-201

收稿日期 2005-04-28

编辑 李东

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>