

暂态电流和电位抬升对雷电风险参数 P_C 的影响

杨仲江, 余蜀豫, 程 斌

南京信息工程大学大气物理学院, 南京 210044

摘要 雷电防护标准 IEC 62305 中定义参数 P_C 为雷击建筑物导致内部系统故障的概率, P_C 完全取决于浪涌保护器 (Surge Protective Device, SPD) 的保护等级。SPD 在很多情况下并不能起到很好的保护作用, 在计算雷电风险值时仅依靠 SPD 的保护等级是不够的。本文建立雷击建筑中钢筋的简化模型, 通过近似的暂态计算得到各钢筋上的电流分布, 以及因暂态电压抬升所产生的反击电压, 分析其对内部系统的干扰, 得出良好的布线方式和线路加装金属管是影响 P_C 参数取值的重要因素, 进而完善 P_C 参数的取值公式。以至于能更加科学准确地计算雷电风险值, 指导雷电防护和规划。

关键词 雷电灾害; 雷电风险评估; 暂态电位; 参数选择; IEC 62305

中图分类号 P49, TM133

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.26.008

Impact of Transient Current and Ground Potential Rising on P_C in Lightning Risk Assessment

YANG Zhongjiang, YU Shuyu, CHENG Bin

Institute of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

Abstract IEC 62305 proposed by the International Electrotechnical Commission is most commonly used. In IEC 62305, parameter P_C is defined as follows: the probability of system failure is due to buildings stroking by the lightning. The parameter depends on the protection level of Surge Protective Device (SPD). However, when lightning strokes buildings, the lightning current in steel will produce electromagnetic interference on the internal system. And when the current runs into the earth, there is a high ground potential increase. In this case, SPD will not work well. Therefore, the definition of P_C is no longer appropriate. Transient calculation models when lightning strokes metal frame of buildings have been proposed. However, no one has applied them to the study of lightning risk assessment. Here, a transient calculation model with Matlab is established to figure out transient current distribution in steels of the buildings when they are stroked by lightning and to calculate the back voltage due to ground potential rise. Under a certain approximate conditions, the effect due to lightning strokes buildings and the current goes into the earth on internal system is analyzed. Using the previous data, a clear physical model is set to show what factors affect the internal system most when lightning strokes buildings or the current goes into the earth. It is able to find that wiring mode and the installation of metal tube are the important parameters having the effect on the value of P_C . Finally, by means of determining the factor that affects the parameter of P_C and improving the parameter value, the value of lightning risk is accurately calculated with this method. The design of lightning protection and the planning of lightning protection are scientifically guided by the method.

Keywords lightning disaster; lightning risk assessment; transient potential; parameter selection; IEC 62305

0 引言

随着社会信息化和电子化的发展, 雷电危害变得越发广

泛而严重。雷电风险评估是防雷减灾的一项重要措施, 能有效减小雷电造成的损失, 科学指导防雷设计和防雷规划。雷

收稿日期: 2011-04-21; 修回日期: 2011-08-15

基金项目: 江苏高校重点研究基地重大项目 (2010JDXM026); 公益性行业科研专项 (GYHY200806014)

作者简介: 杨仲江, 副教授, 研究方向为雷电灾害及防护, 电子信箱: mashimaro2974@126.com

电灾害风险评估的研究目前还处于起步阶段,国际电工委员会和国际电信联盟对雷电灾害风险评估做了大量研究并提出了相应的评估标准,其中 IEC 62305^[1]是现行最常使用的雷电风险评估标准,其适用范围是地闪对建筑物造成的风险的评估,但是依然存在着不少问题。南京信息工程大学的杨仲江、钟万强等通过对参数和公式的修改,将 IEC 62305 很好地运用到露天变电站、热电厂等复杂场所,并且在风险计算中引入了风险权重因子、地区因子等因素^[2],得到了一系列适用性很强的特定场所风险评估方法^[3]。但是风险评估模型中某些不适宜的部分仍然没有得到修改,例如,IEC 62305 中雷击建筑物导致内部系统故障的概率 P_c ,其取值仅取决于浪涌保护器 (Surge Protective Device, SPD) 的匹配保护级别,而事实上,雷电直接击中建筑物,雷电泄流系统中会产生暂态过电流以及出现高的地电位抬升,这时仅靠 SPD 并不能很好地保护内部系统的安全。不少文献^[4-5]提出过建立雷击建筑物金属构架时的暂态计算模型,但还没人将其运用到雷电风险评估的研究中。本文通过建立暂态计算模型,计算出雷击建筑物时钢筋中的暂态电流分布,在一定近似条件下定量分析泄流系统中雷电流和地电位抬升对内部系统线路的影响,从而更加全面地确定影响 P_c 参数的因子以及完善 P_c 参数的取值,使得内部系统的雷电风险评估的计算更加准确可靠。

1 雷击建筑物时钢筋中暂态电流分布的数值模拟

现代建筑物通常利用自身的钢筋框架和墙壁、楼板中的钢筋相互等电位连接,组成雷电防护系统的泄流系统。当雷电击中建筑物时,雷电流通过金属框架产生电压降。利用等效电路法,能比较容易地计算出雷电流在各钢筋中的分布。由于雷电流在钢架中的传播是个波过程,必须等效为分布参数模型,把钢筋离散分割成多个 π 型电路,如图 1 所示。

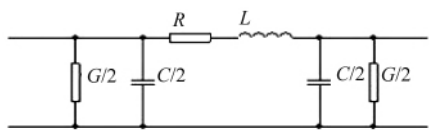


图 1 等效 π 型电路

Fig. 1 Equivalent π circuit

图中, R, L, C, G 分别表示每段钢筋的结构电阻、自电感、自电容和电导 (导体处于导电时可以忽略空气介质,故 G 可忽略不计)。

根据基尔霍夫电流定理和电网络理论得到方程组:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{Y} \\ \mathbf{Z} & \mathbf{G} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{i}} \\ \dot{\mathbf{U}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{I}} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{A}$ 为节点关联矩阵, $\mathbf{Y}$ 为节点导纳矩阵, $\mathbf{Z}$ 为复阻抗矩阵, $\mathbf{G}$ 为电压系数矩阵, $\dot{\mathbf{i}}$ 为支路电流列向量, $\dot{\mathbf{U}}$ 为节点电位列向量, $\dot{\mathbf{I}}$ 为电流源列向量。

由于暂态计算模型是由电阻、电感和部分电容组成的等效网络,电流分布的计算宜在频域中进行。雷电主放电电流可以用式(2)所示的双指数函数表示,将式(2)傅里叶变换可以得到式(3)的频域表达式。通过求解方程组(1)可以得到某一频率下雷电流在钢筋中的电流响应,在求得频域中的计算结果之后,再通过傅里叶反变换将电流响应从频域变回时域。根据 IEC 62305,首次雷击的雷电幅值为 100—200kA,波形为 10/350 μ s,此处选取 100kA,10/350 μ s 的雷电流,以双指数函数描述:

$$i(t)=I_M(e^{-\alpha t}-e^{-\beta t}) \quad (2)$$

其中, I_M 为雷电流大小, α, β 为时间常数, $\alpha=0.00205\mu s^{-1}, \beta=0.564\mu s^{-1}$ 。

对式(2)进行傅里叶变换得

$$I(\omega)=\frac{I(\beta-\alpha)}{(\alpha+j\omega)(\beta+j\omega)} \quad (3)$$

式(3)不能求出上限截止频率 ω_c ,但可以利用式(4)近似确定:

$$20\lg\left[\frac{I(\omega)}{I}\right]\approx-160\text{dB} \quad (4)$$

此处,认为 ω_c 的谐波分量对雷电暂态过程的影响可以忽略不计,可以求得对应截止频率的波长。每段导体取小于波长的 1/10 长度,此处取 10m。假定建筑物为 2 层,长宽高为 20m×10m×20m,如图 2 所示。模拟计算出各钢筋中的雷电流分布如表 1 所示。

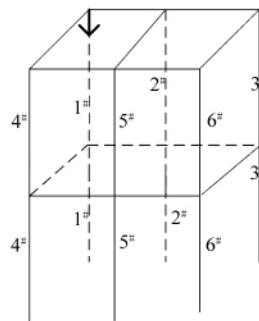


图 2 雷电流从二层 1#钢筋注入

Fig. 2 Lightning current injected from the second floor of 1# steel

表 1 各钢筋中雷电流的分布 (单位: kA)

Table 1 Distribution of lightning current in the steels (unit: kA)

层数	1#	2#	3#	4#	5#	6#
二层	35.07	12.21	10.33	15.72	9.84	9.97
一层	23.24	12.65	13.40	17.89	13.42	12.88

2 钢筋中暂态电流造成的感应过电压

雷电直接击中建筑物时,每段钢筋都有电流流过,注入

点的引下线承担了大部分电流分量,其他钢筋上也有电流流过。从上面的模型可以看出,雷电注入点引下线的电流随楼层逐渐减小,其他引下线上的电流逐渐增大,建筑物楼层较高的钢筋引下线最终能达到电流平衡。由于钢筋导体在接闪时都会出现瞬间大电流脉冲,建筑物内任一开口或闭合的环路都会感应出一定的过电压。每次闪电击中建筑物时雷电注入点是随机分布的,可以证明,不同楼层相同位置处的设备环路因钢筋电流产生的暂态磁场影响而感应出的电压相差不大,现在假设顶层设备环路离注入点钢筋最远的情况,此时环路受暂态磁场影响最小。

IEC 62305 中规定为了避免构成大的回路,同一导线构成的环路面积应小于 10m^2 。如图 3 所示,其中 A, B 为不同钢筋, M 为导线环路, L_1, L_2 为环路到不同钢筋的距离。令环路面积 $S=9\text{m}^2$ (没有构成大的回路), $L_1=10\text{m}, L_2=1\text{m}$ 。



图 3 钢筋导体中暂态过电流对回路的影响
Fig. 3 Effect of transient over-current on circuit

雷电流在钢筋中传播时,由于耦合作用,雷电流脉冲波头一般在 $1\sim 5\mu\text{s}$ (这里不影响导体长度取 10m) 可以得到环路与钢筋 A 的互感 $M_1=0.2\mu\text{H}$, 环路与钢筋 B 的互感 $M_2=0.97\mu\text{H}$ 。

环路中产生的感应电压为

$$U=M_1\left(\frac{\Delta i_1}{\Delta t}\right)+M_2\left(\frac{\Delta i_2}{\Delta t}\right) \quad (5)$$

计算得出环路中的感应电压为大于 6kV 。

除此之外,在雷电流载流导线附近,无屏蔽的导线也会感应出横向电压^[6]。导线平行于钢筋时感应出的横向电压要比垂直于钢筋时大得多,这里只讨论导线平行于引流钢筋的情况,如图 4 所示。

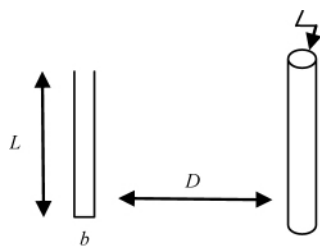


图 4 钢筋导体中暂态过电流对系统线路的影响
Fig. 4 Effect of transient over-current on system line

对于线间距离 $b=3\text{mm}$ 的信号线,线长 L 假设为 10m ,只考虑最大电流的钢筋中引下线的情况,电流取表 1 中二层 1[#]

的电流值 35.07kA ,这时线间的感应横向电压为

$$U=M\cdot L\left(\frac{\Delta i}{\Delta t}\right) \quad (6)$$

此处 $M\approx 0.6\text{nH/m}$,计算得出感应横向电压为 80V (信息系统线路的正常运行电压通常不到 10V)。

由此可知,钢筋中的雷电流会产生脉冲暂态磁场,与其交链的回路将感应出暂态过电压,从而危及相连的设备。由于雷电流分布于所有钢筋,产生的暂态磁场充斥着整个三维空间,对于设备耐冲击电压额定值为 2.5kV 的普通用电器,哪怕布线没有形成大的回路也会感应出危险的电压。建筑内部使用的 SPD 通常是对某几个特定的敏感设备或者区域进行保护,对于数目众多的用电设备,单纯利用 SPD 很难保护周全。为了防止这种情况发生,应该对与设备相连的导线穿金属管或者布设在防雷电的金属沟槽中,这种布设方式对各种电磁脉冲都具有良好的屏蔽能力,能有效减小线路因暂态磁场感应的电压,同时也能将信号线路上感应出的横向电压降低到安全范围以内。对于雷击建筑物钢筋中有暂态电流流过时,通过以上的分析可以看出良好的布线方式、采用屏蔽电缆以及穿金属管能有效地减小内部系统失效的概率(P_c),不能只依靠 SPD 的保护。

3 雷击建筑物暂态电位抬升和反击

建筑物遭受雷击时,雷电流 I_m 注入防雷接地装置,在接地电阻 R 上形成强大的冲击电压 U_m ,这时与该接地系统连接的金属构架、管道和电气设备外壳将处在很高的电位上,这一现象称为暂态电位抬升。在内部系统中,电气设备的绝缘相当于电容 C ,其端部与电源网络相连,在波动过程中相当于经线路波阻抗 Z 接地。电气设备绝缘作用的电压取决于电压波形和 ZC 回路时间常数。

这里引入反击系数^[7]:

$$K_s=\Delta U/U=\Delta U/(IR_i) \quad (7)$$

对于普通建筑物,反击系数 $K_s=0.05$,冲击接地电阻 $R_i=10\Omega$,流过接地装置的电流 $I=100\text{kA}$,反击电压 $\Delta U=50\text{kV}$,足以使设备绝缘击穿。

为了避免击穿的危险,通常将需要保护的设备(或者屏蔽室进出线处)分级加装 SPD。但在反击情况下,各级 SPD 都等电位并联在一起,共同处于高电位状态,此时它们的动作先后决定于哪个 SPD 起动电压低和响应时间快。一般第一、二级开关型 SPD 的起动电压高,起动时延长,不能率先动作;电子触发型的 SPD 能解决其先期不能起动的问题,但有可能产生截波。这样,率先响应的是末级的限压型 SPD,末级 SPD 是用来限制敏感设备两端的暂态电压,通流容量不大的它们很可能会被击穿,击穿伴随电弧出现,因此会有末级 SPD 失火的可能。对于开关型 SPD (如放电管),若在暂态过电压下放电导通,将呈现出很低的阻值,相当于再一条传输线末端发生短路,这时暂态过电流绝大部分会被短路反射回去,并没

有被吸收掉,而反射波电流产生的空间电磁场也会对周围的系统产生影响^[8]。

对于以上情况,SPD 就不能很好地起到保护系统设备的作用了。应该对线路管道加装屏蔽线缆或金属管,由于金属管的电磁屏蔽和电磁封锁作用,芯线上反击电压系数最小足以小到 0.0001,芯线中产生的纵向耦合电压将会小很多,这样可以大为简化 SPD 的选取甚至不用。对于与设备相连的外引信号线和电源线,最好全部穿钢管埋地安装,出现暂态高电位抬升时,SPD 只能沿线路一维地泄放雷电流,这样衰减得慢,影响范围可大到几千米外,而钢管向地中地泄放是三维的,几十米就可以衰减到安全范围之内^[9]。因此,对于出现暂态电位升时,内部系统失效的概率(P_c)的取值应该取决于是否加装金属管等措施,而不应只依赖于 SPD 的保护。

4 P_c 参数的确定因子以及取值

综合上面的分析,IEC 62305 中所规定的“ P_c 取决于 SPD 的配合保护, $P_c=P_{SPD}$ (P_{SPD} 为按防雷级别选取并安装 SPD 后的值,其取值见表 2)”是不够全面的。雷击建筑物导致内部系统故障的概率 P_c 首先应该取决于系统线路是否为防雷电缆或者穿金属管敷设,然后再由综合布线方式和 SPD 的匹配保护共同决定。具体取值如下。

若与内部系统相连的外部导线和内部主线为防雷电缆或者布设与防雷沟槽、金属导管时, $P_c=10^{-4}$,未能满足以上条件时, $P_c=P_{SPD} \cdot P_k$ (P_k 为不同布线的取值,如表 3 所示)。

表 2 P_{SPD} 的取值
Table 2 Values of P_{SPD}

雷电防护水平 (LPL)	P_{SPD}
未采取匹配的 SPD 保护	1
II	0.2
当采用了比 LPL I 性能更优的 SPD	0.05
III-IV	0.3
I	0.1

表 3 P_k 的取值
Table 3 Values of P_k

布线方式	P_k
非屏蔽电缆-布线为避免构成环路	1
非屏蔽电缆-布线避免构成大的环路	0.5
非屏蔽电缆-布线避免构成环路	0.1
屏蔽电缆	0.01

5 结论

本文通过对钢筋暂态模型的计算,和分析暂态电流和暂态电位抬升对内部系统的影响,可以得出以下结论:

(1) P_c 参数作为雷击建筑物导致内部系统故障的概率,

仅取决于 SPD 的保护级别是不够的。

(2) 当雷击建筑物,钢筋中流过暂态过电流以及出现高的地电位抬升时,良好的布线方式和线路加装金属管才能有效地保护内部系统,使用公式 $P_c=P_{SPD} \cdot P_k$ 修正参数 P_c 。

IEC 62305 中各参数的取值难以定量精确化,以上的分析仅是在理论模型下得出,具体情况是否相符合还需要实践来检验。

参考文献 (References)

- [1] IEC81 技术委员会. IEC 62305: 2006 雷电防护[S/OL]. [2011-01-10]. <http://webstore.iec.ch>.
IEC Technology Committee 81. IEC 62305: 2006 Protection against lightning[S/OL]. [2011-01-10]. <http://webstore.iec.ch>.
- [2] 钟万强. 雷电灾害风险评估的参数研究和模型设计 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2004.
Zhong Wanqiang. The parameter study of lightning risk assessment[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2004.
- [3] 杨仲江. 雷电灾害风险评估与管理基础[M]. 北京: 气象出版社, 2009.
Yang Zhong jiang. The lightning risk assessment and base of management[M]. Beijing: Meteorology Prss, 2009.
- [4] 戴传友. 雷击金属结构物时构架电流分布的计算方法 [J]. 建筑电气, 2001, 20(4): 40-42.
Dai Chuanyou. Building Electricity, 2001, 20(4): 40-42.
- [5] 冯雷, 周佩白. 高层建筑受雷击的数值模型[J]. 高压电器, 2000, 36(6): 3-7.
Feng Lei, Zhou Peibai. High Voltage Apparatus, 2000, 36(6): 3-7.
- [6] Hasse P. Overvoltage protection of low voltage systems [M]. London: The Institution of Electrical Engineer, 2000.
- [7] 长江水利委员会长江勘测规范设计研究院. DL_T_5090-1999 水电厂过电压保护和绝缘配合导则[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
The Yangtze River Water Resources Commission & Code Design and Research Institute. DL_T_5090 -1999 Overvoltage protection and insulation coordination design guide for hydro-power station [S]. Beijing: China Standard Press, 1999.
- [8] 许颖, 刘继, 马宏达, 等. 建(构)筑物雷电防护[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Xu Yin, Liu Ji, Ma Hongda, et al. The lightning protection of buildings [M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2010.
- [9] 马宏达. 学习和引用 IEC 建筑物防雷规范中值得商榷的几个问题[J]. 建筑电气, 2004(2): 11-13.
Ma Hongda. Building Electricity, 2004(2): 11-13.
- [10] 张月鸿, 武建军, 吴绍红. 现代综合风险治理与后常规科学 [J]. 安全与环境学报, 2008, 8(5): 116-121.
Zhang Yuehong, Wu Jianjun, Wu Shaohong. Journal of Safety and Environment, 2008, 8(5): 116-121.
- [11] 黄沿波, 梁栋, 康雅乔, 等. 风险的三维评价方法 [J]. 自然灾害学报, 2010, 19(3): 88-93.
Huang Yanbo, Liang Dong, Kang Yaqiao, et al. Journal of Natural Disaster, 2010, 19(3): 88-93.

(责任编辑 代丽)