

变电所直接雷击下的 LEMP 计算

李刚

(浙江工业大学, 浙江 杭州 310027)

摘要: 给出了使用电路法进行数值模拟雷击电流暂态分布的原理, 采用电路方法和数值计算方法并且结合试验验证, 对于金属构架在雷击情况下的建筑物内部电磁场分布进行仿真和分析, 讨论雷电流在金属框架内的分布和暂态电磁场分布, 定量地计算建筑物内部某定点的电磁场数值, 分析建筑物内部存在其他金属构架对在暂态电磁场分布的影响, 并且根据实验对计算结果进行了验证。

关键词: 直接雷击; 电路法; 电磁场

Calculation of transformer substation during direct lightning stroke

LI Gang

(Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310027, China)

Abstract: This paper presents the calculation principles of transient lightning current distribution by circuit approach. It simulates and analyses the distribution of the electromagnetism field inside the building for metals frame at thunder, by electric circuit method, number calculation method and combination experiment verification. Transient current distribution and transient electromagnetic distribution are discussed. The electromagnetic value of some point is quantitatively calculated inside the structure and the influence of electromagnetic field if there is another metal structure inside it is analysed. And the calculation result is verified with experiment.

Key words: direct lightning stroke; circuit approach; electromagnetic field

中图分类号: TM711

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)11-0075-04

0 引言

当雷电直击变电站内建筑物, 其中的钢筋结构部分就构成了一个典型的法拉第笼式结构, 构架的主体和避雷针以及接地结构相联接, 当建筑物遭受雷击的时候, 巨大的电流将会在建筑物内部进行流动, 对人和生产的安全都会造成巨大危害, 特别是建筑物内部的敏感电子设备, 会受到巨大雷电流形成的电磁场变化的影响, 以至于失灵或者损坏。因此对于变电站的 LEMP 研究有着很大的必要性。

本文采用电路方法和数值计算方法并且结合试验验证, 对于金属构架在雷击情况下的建筑物内部电磁场分布进行仿真和分析, 从而定量地分析建筑物的电磁场区域分布。并且对于建筑物内部存在大量的金属结构物体, 对电磁场分布的影响进行了分析和对比。这对于电力系统的雷电保护和研究都有积极的意义。

1 计算原理

建筑物的金属机构体相互连接构成一个金属笼

式结构, 这个结构体可以模拟为一个等效电路网络。用电路的方法来计算雷电流在这个等效模型内部的流动和分布, 为了避免谐振情况, 组成构架的最长导体长度 D 不能超过雷电流最大频谱分量所对应最小波长的 $1/10$, 建筑物框架的导体被仿真一系列相互耦合的 π 型等值电路, 每段导体与其他导体之间都存在电感和电容耦合, 对于每段导体的自感和互感我们使用 Neumann 公式^[1]进行计算

$$M = \frac{\mu_0}{4\pi} \iint_{l_1 l_2} \frac{dl_1 dl_2 \cos \varphi}{D} \quad (1)$$

充分考虑大地的透入深度的影响, 在电感计算过程中考虑到在高频情况下集肤效应的影响, 电流都集中在导体的外表面, 计算电感时充分考虑导体参数的影响进行电感计算, 计算过程中使用插值型 10 参数 gauss 数值积分算法, 保证了数值计算的精度。

在等值网络中按照一定的规则给支路和节点进行相应的编号, 根据前面建立的 π 型等值电路, 每条支路中都存在电感和电容量, 所以可以依次建立

阻抗矩阵[Z]和导纳矩阵[Y]。

$$[Z] = \begin{bmatrix} R_m + j\omega L_m & \cdots & j\omega L_{mn} \\ \vdots & & \vdots \\ j\omega L_{nm} & \cdots & R_n + j\omega L_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$[Y] = \begin{bmatrix} \ddots & & \\ & \sum \frac{j\omega C_m}{2} & \\ & & \ddots \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中： R_m 为第 m 条支路的电阻， L_m 为第 m 条支路的自感， $L_{mn} = L_{nm}$ 为 m 、 n 支路间的互感， C_m 为与第 m 各节点线关联的支路的电容。分析支路阻抗特征方程，我们可以得到：

$$\begin{bmatrix} A & Y \\ Z & G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I(\omega) \\ U_n(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_s(\omega) \\ U_s(\omega) \end{bmatrix} \quad (4)$$

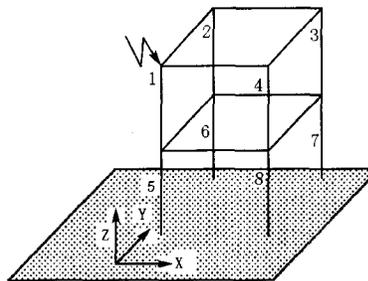
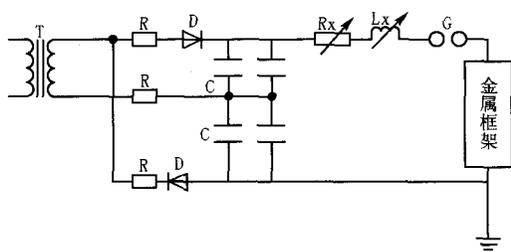


图 1 实验平台

Fig.1 Experiment terrace

如图 1 搭建实验平台，T 为充电变压器，D 为整流硅堆，R 为充电电阻，C 为充电电容，r 为电容器保护电阻， R_x 、 L_x 分别为调波电阻和调波电感，S 为分流器，G 为球隙。

金属导体直径 8 mm，雷电流使用 8/20 μ s，电流幅值为 10 kA，雷击点如图 1 所示，实验金属框架结构为 $X \times Y \times Z$ 为 $1 \times 1 \times 2$ m，分为两层。

实验数据预量数据对比如表 1 所示。经过对比，实验数据和计算结果比较吻合，验证了程序的可行性。

3 算例

在雷电直击的情况下只有电流源 $I_s(\omega)$ 存在，所以可以有以下矩阵形式^[2]

$$\begin{bmatrix} A & Y \\ Z & G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I(\omega) \\ U_n(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_s(\omega) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中： A 为节点支路关联矩阵， $U_n(\omega)$ 为节点电压矩阵， $I_s(\omega)$ 为支路中的电流源矩阵， $I(\omega)$ 为支路电流矩阵， $U_s(\omega)$ 为电压源矩阵。

对入射雷电流进行傅立叶变换，雷电流波形采用双指数波形，使用时间抽取基 2-DIF 方法的 FFT 变换，将长度为 N 的系列傅立叶变换逐次分解为计算长度较短的系列变换，将长度为 N 的变换转换为长度为 $N/2$ 的变换计算，提高了运算效率。利用在频域中建立网络方程，然后在每一个离散的频域率点上对网络进行数值求解，然后进行傅立叶反变换转化到时域，即得到了时域的暂态响应。在获得支路电流以后我们可以应用毕奥—沙伐定理获得建筑物内部任意点的电磁场数值。

2 仿真结果验证

变电站建筑物内部会有很多电子设备、金属框架或者金属短路框，电子设备外金属构架和其他金属框架对于电磁场的分布也会造成一定的影响，对于敏感的电子设备，我们进行数值分析的时候也不能忽略。对于此类金属框架我们可以依据前面对于建筑物构架的仿真方法，进行同样的计算分析，根据实际情况要对金属框架的电感、电容、电阻参数进行设定，以保证计算结果的准确性。

选取如下简单建筑物金属框架进行仿真计算，建筑物尺寸 $X \times Y \times Z$ 为 $15 \times 12 \times 9$ m，在 Z 方向建筑物分为两层， XY 方向网格 $3m \times 3m$ ，雷直击建筑物顶端避雷针，具体位置和构造如图 2 所示，入

射雷电流波形为 $8/20 \mu s$, 幅值为 100 kA , 建筑物导体半径 0.01 m 。

表 1 实验数据预量数据对比

Tab.1 Experiment data compared with data measured in advance

支路编号	1	2	3	4	5	6	7	8
实验数值/%	40.4	20.2	16.0	20.2	30.9	23.4	20.2	23.4
计算结果/%	40.9	21.4	16.2	21.4	30.1	24.4	21.2	24.4
偏差/%	1.25	5.9	1.25	5.9	2.59	4.27	4.95	4.27

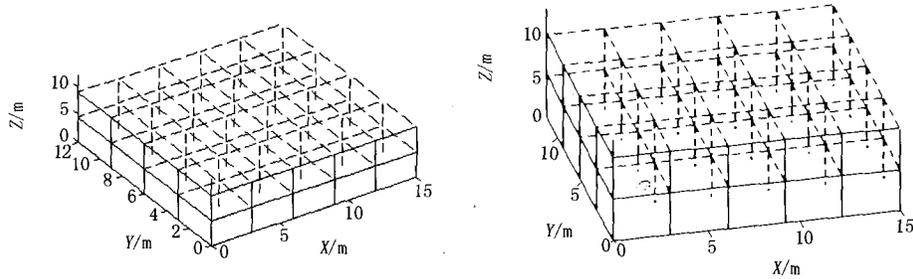


图 2 建筑物构架

Fig.2 Building frame

建筑物内部存在金属短路框, 位置在二层, $y=2.5$ 的平面上, 尺寸为 $1 \times 1 \text{ m}$, 框架为田字形, 在 XZ 平面内的坐标位置及导体编号如图 3 所示。

内部的小金属短路框并没有和大的建筑物框架形成电路连接, 他们之间只存在感应电流, 建筑物框架的支路电流经过计算对比, 电流分布基本没有发生变化, 在金属短路框上感应出的感应电流, 经过计算得到短路框上的感应电流最大值如表 2。

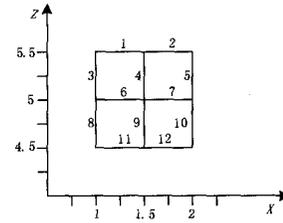


图 3 短路框结构

Fig.3 Short circuit frame structure

表 2 短路框上电流分布

Tab.2 Electric current distribution on the short circuit frame

短路框上支路	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
电流/A	540	346	540	194	346	69	57	471	181	290	471	290

电磁场强度选取每个点上的最大值进行比较, 短路框附近的位置受框架的影响最为明显, 我们选取建筑物内部 3 个位置的电磁场强度最大值进行对比, 其中实线为原框架内的线电磁场强度, 虚线为加入短路框以后的线电磁场强度(见图 4)。

1) 田字框中心垂直田字框的线段, y 取 $1 \sim 3 \text{ m}$

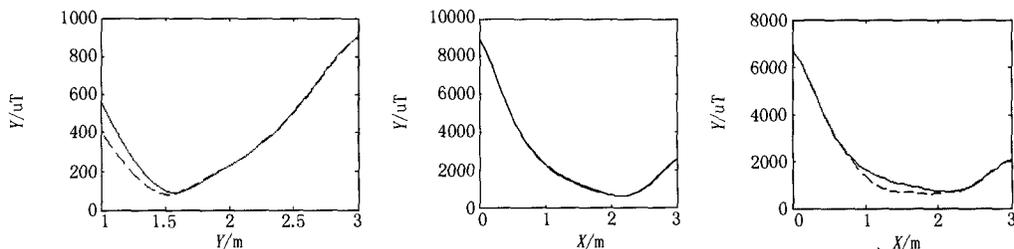


图 4 3 条线段上的线磁场对比

Fig.4 Three lines magnetic field comparison

的线段。

2) 在 $y=0.5 \text{ m}$ 的平面上, 短路框正上方 0.5 m 处, 即 $z=6 \text{ m}$ 处, x 取 $0 \sim 3 \text{ m}$ 的线段。

3) 在 $y=0.75 \text{ m}$ 的平面上, $z=5 \text{ m}$ 的高度, x 取 $0 \sim 3 \text{ m}$ 的线段。

对比发现在第一种情况下,距离框架约 1 m 和更远的距离处磁场强度和原框架下相比基本重合,但在距离短路框 0.5 m 位置处磁场强度比原框架下增大了 25%。在第二种情况下线磁场强度基本没有发生任何变化,在第三种情况中只是在 x: 1 m 到 2 m 的位置上电磁场有变化,其他位置也基本没有改变。由此可见金属短路框对于电磁场的影响仅仅在短路框邻近的位置,而且主要在短路框的前后侧,其他位置的电磁场基本不发生改变。

4 结论

1) 本文导出了变电所内雷击建筑物框架时电流暂态分布和暂态电磁场计算的仿真计算原理,并且根据实验对计算结果进行了验证。

2) 应用到变电站内部存在其他金属框架情况下的电流暂态分布和暂态磁场分布的计算,分析建筑物内部存在金属短路框情况下的电流和电磁场分布影响。

参考文献

- [1] Grover F W. Inductance Calculation[M]. New York: Dover Publication, 1988.
- [2] 冯雷, 周佩白. 高层建筑物受雷击的数值模型[J]. 高压电器, 2000, (6): 3-7.

(上接第 68 页 continued from page 68)

进一步理解 CIM 的基础上, 对其进行扩展, 建立一二次系统完备的电网模型, 为我国的电力企业发展打下坚实的基础。

参考文献

- [1] 张慎明, 刘国定. IEC61970 标准系列简介[J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (14): 1-6.
ZHANG Shen-ming, LIU Guo-ding. Introduction of Standard IEC 61970 [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26 (14): 1-6.
- [2] 潘毅, 周京阳, 吴杏平, 等. 基于电力系统公共信息模型的互操作试验[J]. 电网技术, 2003, 27(10): 31-35.
PAN Yi, ZHOU Jing-yang, WU Xing-ping, et al. Interoperability Test Based on Common Information Model [J]. Power System Technology, 2003, 27 (10): 31-35.
- [3] 孙宏斌, 吴文传, 张伯明, 等. IEC61970 标准的扩展在调度控制中心集成化中的应用[J]. 电网技术, 2005, 29 (16): 21-25.
SUN Hong-bin, WU Wen-chuan, ZHANG Bo-ming,

FENG Lei, ZHOU Pei-bai. The Number Model of Key Figure Building Which is Subjected to a Thunder[J]. High Voltage Electric, 2000, (6): 3-7.

- [3] ZHOU Qi-bin, Du Y. Using EMTP for Evaluation of Surge Current Distribution in Metallic Gridlike Structures[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2005, 41 (4): 1113-1117.
- [4] 张小青, 陈水明. 直接雷击时高层建筑物内暂态磁场的计算[J]. 电机工程学报, 2001, 21 (1): 40-43.
ZHANG Xiao-qing, CHEN Shui-ming. The Calculation of Temporary Magnetic Field Inside the Key Figure Building when it is Being Subjected to a Thunder Directly[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(1): 40-43.
- [5] 卡兰塔罗夫, 采伊特林. 电感计算手册. 北京, 机械工业出版社, 1992.
Karahtaroph П.Л. Калантаров. Триетерлин Л.А. Цейтлин. The Inductor Calculation Manual[M]. Beijing: China Machine Press, 1992.

收稿日期: 2007-04-25

作者简介:

李刚 (1971-), 男, 硕士, 工程师, 从事电力系统分析和电力自动化方面的研究工作。E-mail: Ligang@zjut.edu.cn

et al. Application of Extension of IEC61970 Standard in Control Center Integration [J]. Power System Technology, 2005, 29 (16): 21-25.

- [4] Draft IEC 61970: Energy Management System Application Program Interface(EMS-API)—Part 1: Guidelines and General Requirements[S].
- [5] Draft IEC 61970: Energy Management System Application Program Interface(EMS-API)—Part 301: Common Information Mode (CIM) Base[S].
- [6] Draft IEC 61970: Energy Management System Application Program Interface(EMS-API)—Part 501: CIM RDF Schema[S].

收稿日期: 2006-07-15

修回日期: 2006-09-18

作者简介:

毛鹏 (1973-), 男, 博士后, 从事电力系统继电保护、变电站综合自动化领域的研究工作; E-mail: maopeng7073@vip.sina.com

魏晋雁 (1981-), 女, 硕士, 从事电力故障诊断。