

雷击石油化工装置电磁脉冲危害研究

毕晓蕾^{1,2}, 刘全桢^{1,2*}, 于海燕³, 刘宝全^{1,2}, 高鑫^{1,2}, 刘娟^{1,2}, 姜辉^{1,2}, 高剑^{1,2}

1 中国石油化工股份有限公司青岛安全工程研究院, 青岛 266071

2 化学品安全控制国家重点实验室, 青岛 266071

3 国网山东电力公司荣成市供电公司, 荣成 264300

* 通信作者, liuqz.qday@sinopec.com

收稿日期: 2016-11-15

国家科技支撑计划课题“罐区重大燃爆事故防范关键技术”(2012BAK03B03)资助

摘要 为了分析雷击石油化工装置产生的雷电电磁脉冲危害, 基于电流线性衰减的传输线雷电模型, 采用时域有限差分法仿真计算了 100 kA 强雷电雷击石油化工装置产生的电磁脉冲。结果表明, 水平电场在地面以上受地面反射影响波形变化很大, 而地面以下波形变化不大, 主要是幅值的变化; 垂直电场地面上下的幅值差别非常大, 地上的波形随高度的增大差别不大, 地下的波形第一个峰值随深度的增大而减小, 由于反射的影响, 第二个峰值随深度的增大反而有所增大; 水平磁场的变化比较规则, 地上的水平磁场受高度的影响较小, 仅随与通道距离的增大而减小, 地下的水平磁场随深度的增大, 幅度有所衰减, 波形趋向平滑; 在地上 5 m, 距离雷电通道 10 m 处的水平电场峰值达到了 110 kV/m 以上, 垂直电场峰值达到了 240 kV/m 以上, 水平磁场峰值达到了 2 300 A/m 以上, 如此强大的电磁脉冲对石化企业的防雷设计是一种严峻考验。

关键词 雷击; 石化装置; 雷电电磁脉冲; 时域有限差分法

0 引言

雷电是自然界中一种激烈的放电现象, 由此引起的雷击灾害被联合国列为十大自然灾害之一。据有关部门统计, 全世界平均每分钟发生雷暴 2 000 次, 所导致的火灾、爆炸等时有发生。据不完全统计, 每年因雷电而造成的伤亡的人数大约有 3 000~4 000 人, 因雷电灾害造成的直接和间接经济损失达到几十甚至上百亿元。

我国石化企业多数分布在沿江沿海雷电灾害频发地区, 易发生雷击事故。在石油化工生产厂区, 往往存在大量易燃易爆混合物^[1], 雷电产生的电火花一旦

引起爆炸就会造成巨大破坏和人员伤亡, 因此, 石化厂区的防雷越来越重要。近年来, 因雷击高大石化装置产生的电磁脉冲造成仪表和电气设备损坏、分布式控制系统死机等事故时有发生, 给石化企业的安全生产造成了较大影响。

为了分析雷击石化装置的电磁辐射危害, 本文对雷击石化装置产生的雷电电磁脉冲(LEMP)的分布规律进行计算研究。雷击石化装置的理论计算可分为 3 个步骤: 首先是建立雷击石化装置雷电通道模型, 描述雷电回击过程, 解决辐射源的问题; 其次是选择电磁场辐射计算方法; 最后是根据实际情况, 建立计算模型, 通过计算得到电磁辐射计算结果。

引用格式: 毕晓蕾, 刘全桢, 于海燕, 刘宝全, 高鑫, 刘娟, 姜辉, 高剑. 雷击石油化工装置电磁脉冲危害研究. 石油科学通报, 2016, 03: 401-406

BI Xiaolei, LIU Quanzhen, YU Haiyan, LIU Baoquan, GAO Xin, LIU Juan, JIANG Hui, GAO Jian. Research into the electromagnetic pulse risk of a petrochemical plant struck by lightning. Petroleum Science Bulletin, 2016, 03: 401-406. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2016.03.035

1 雷击石化装置雷电通道模型

根据回击模型支配方程式的种类,雷电通道模型可分为气体动力学模型^[2-4]、电磁模型^[5-7]、分布电路模型^[8-10]和工程模型^[11-18]。本文的雷电通道模型采用工程模型中的电流线性衰减的传输雷电模型(MTLL)进行理论计算研究。石化装置可以简化为图 1,石化装置作为雷电流放电通道的一部分,会引起雷电流的反射,如图 1 所示,雷电流在石化装置顶部和石化装置底部都会存在反射,反射系数为:

$$\rho_{\text{top}} = \frac{Z_{\text{ob}} - Z_{\text{ch}}}{Z_{\text{ob}} + Z_{\text{ch}}} \quad (1)$$

$$\rho_{\text{bot}} = \frac{Z_{\text{ob}} - Z_{\text{gr}}}{Z_{\text{ob}} + Z_{\text{gr}}} \quad (2)$$

其中, Z_{ch} 石化装置顶部以上部分雷电通道特征阻抗, Z_{ob} 为石化装置特征阻抗, Z_{gr} 为大地特征阻抗。

当 $0 \leq z' \leq h$, 雷电通道的电流分布, 即沿石化装置的雷电流分布为:

$$I(z', t) = \frac{1 - \rho_{\text{top}}}{2} \sum_{n=0}^{\infty} \left[\rho_{\text{bot}}^n \rho_{\text{top}}^n I_{\text{sc}} \left(h, t - \frac{h - z'}{c} - \frac{2nh}{c} \right) + \rho_{\text{bot}}^{n+1} \rho_{\text{top}}^n I_{\text{sc}} \left(h, t - \frac{h + z'}{c} - \frac{2nh}{c} \right) \right] \quad (3)$$

当 $z' > h$, 即石化装置顶部以上的雷电通道电流分布为:

$$I(z', t) = \frac{1 - \rho_{\text{top}}}{2} \left[I_{\text{sc}} \left(h, t - \frac{z' - h}{v} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} \rho_{\text{bot}}^n \rho_{\text{top}}^n I_{\text{sc}} \left(h, t - \frac{z' - h}{c} - \frac{2nh}{c} \right) \right] \quad (4)$$

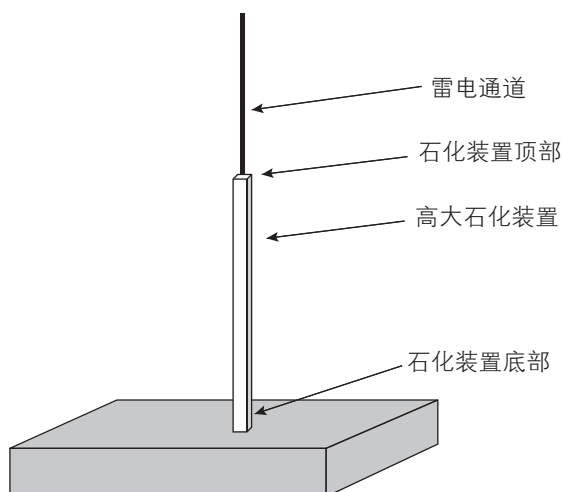


图 1 雷击石化装置示意图

Fig. 1 Sketch of a petrochemical plant struck by lightning

式中, h 为石化装置高度; $I(z', t)$ 为 t 时刻, 通道内 z' 位置上的电流值, z' 的起始位置为石化装置顶部; c 为光速; $I_{\text{sc}}(h, t)$ 为雷击短路电流; v 为沿雷电通道的雷电流传播速度, 石化装置顶部以上空间雷电流传播速度 $v = c/3$, 石化装置上雷电流传播速度 $v = c$; n 为在雷电波发生反射的次数。

2 雷击石化装置电磁辐射计算方法

本文在计算中采用时域有限差分法(FDTD)^[7-8]对地闪回击通道附近 LEMP 的分布规律进行研究。雷电放电通道采用 MTLL 回击模型进行模拟, 假设雷电放电通道垂直于地面, 则雷电放电通道周围的场具有对称性, 场分量的大小与方位角无关, 因此可看成一个二维问题在柱坐标下求解, 雷电放电通道附近 LEMP 的网格划分如图 2 所示。

二维柱坐标系下的差分方程如下^[9]:

$$E_r^{n+1} \left(i + \frac{1}{2}, j \right) = \frac{2\varepsilon - \sigma\Delta t}{2\varepsilon + \sigma\Delta t} E_r^n \left(i + \frac{1}{2}, j \right) - \frac{2\Delta t}{(2\varepsilon + \sigma\Delta t)r_i\Delta r} \cdot \left[H_\phi^{n+1/2} \left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2} \right) - H_\phi^{n+1/2} \left(i + \frac{1}{2}, j - \frac{1}{2} \right) \right] \quad (5)$$

$$E_z^{n+1} \left(i, j + \frac{1}{2} \right) = \frac{2\varepsilon - \sigma\Delta t}{2\varepsilon + \sigma\Delta t} E_z^n \left(i, j + \frac{1}{2} \right) + \frac{2\Delta t}{(2\varepsilon + \sigma\Delta t)r_i\Delta r} \cdot \left[r_{i+1/2} H_\phi^{n+1/2} \left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2} \right) - r_{i-1/2} H_\phi^{n+1/2} \left(i - \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2} \right) \right] \quad (6)$$

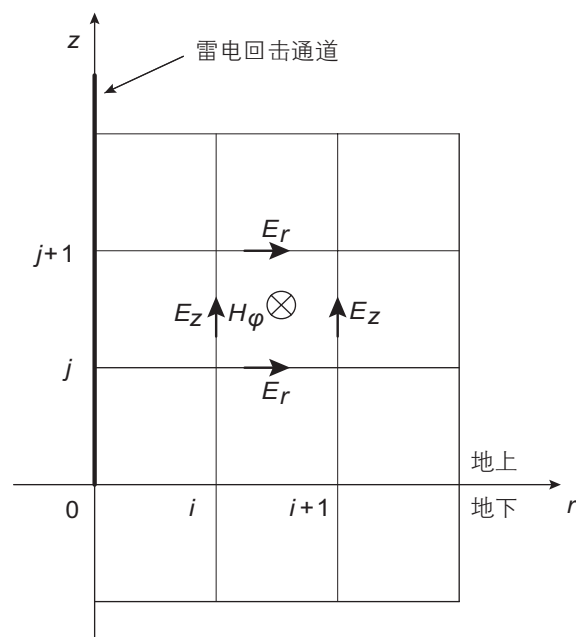


图 2 二维柱坐标下 FDTD 计算域网格划分

Fig. 2 FDTD two-dimensional computational domain mesh division

$$\begin{aligned}
H_{\phi}^{n+1/2}\left(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}\right) &= H_{\phi}^{n-1/2}\left(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}\right) \\
&+ \frac{\Delta t}{\mu_0 \Delta r} \left[E_z^n\left(i+1, j+\frac{1}{2}\right) - E_z^n\left(i, j+\frac{1}{2}\right) \right] \\
&- \frac{\Delta t}{\mu_0 \Delta z} \left[E_r^n\left(i+\frac{1}{2}, j+1\right) - E_r^n\left(i+\frac{1}{2}, j\right) \right]
\end{aligned} \quad (7)$$

考虑到所计算问题的轴对称性,为减少计算量,可以只计算包含回击通道在内的半个剖面内的场,为此需要对轴线上的 E_z 作特殊处理。根据安培环路定理,在雷电放电通道高度范围外,不存在雷电流,采用如下差分格式:

$$\begin{aligned}
E_z^{n+1}\left(i, j+\frac{1}{2}\right) &= \frac{2\varepsilon - \sigma\Delta t}{2\varepsilon + \sigma\Delta t} E_z^n\left(i, j+\frac{1}{2}\right) \\
&+ \frac{8\Delta t}{(2\varepsilon + \sigma\Delta t)\Delta r} H_{\phi}^{n+1/2}\left(\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}\right)
\end{aligned} \quad (8)$$

在雷电放电通道高度范围内,有雷电流存在,采用如下差分格式:

$$\begin{aligned}
E_z^{n+1}\left(i, j+\frac{1}{2}\right) &= \frac{2\varepsilon - \sigma\Delta t}{2\varepsilon + \sigma\Delta t} E_z^n\left(i, j+\frac{1}{2}\right) \\
&+ \frac{8\Delta t}{(2\varepsilon + \sigma\Delta t)\Delta r} H_{\phi}^{n+1/2}\left(\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}\right) - \frac{4\Delta t}{\pi\varepsilon_0\Delta r^2} I\left(0, j+\frac{1}{2}\right)
\end{aligned} \quad (9)$$

式中, $I(0, j)$ 为距地面高度为 $j\Delta z$ 处的电流元,可选择某种回击模型和通道基电流进行计算; ε 和 σ 分别表示自由空间或大地的介电常数和电导率,地面分界面处的电导率和电容率参数设置为大地与空气的平均值。

边界的截断采用改进的Mur一阶吸收边界条件^[10]:整个计算过程通过迭代计算得到域内的电场和磁场,雷电通道的引入通过式(9)垂直电场的计算引入,式(9)中电流 I 通过式(3)、(4)及MTLL雷电通道模型计算得到。

3 雷击石化装置电磁辐射仿真结果

计算中采用的雷电通道基电流采用双指数模型,表达式为:

$$I_{sc} = 1.1I_0(e^{-9.2 \times 10^3 t} - e^{-0.8 \times 10^7 t}) \quad (13)$$

其中, I_0 为强雷电情况的雷电流峰值,取典型的雷电流峰值 12 kA。图 3 给出了 55 m 高度石化装置顶部的雷电流波形,可以看到雷电流出现了明显的反射。

根据现场考察石化装置的环境,取大地电导率为 0.001 S/m,大地相对电容率 ε_r 设为 10 F/m,雷电通道高度设为 1 000 m。

图 4 为雷击不同高度石化装置水平电场分布情况,

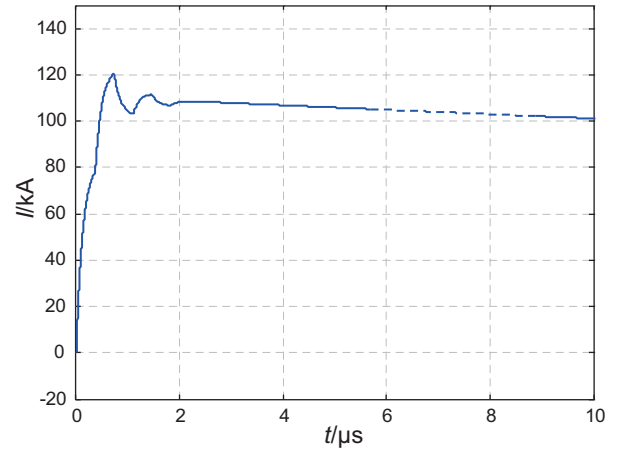
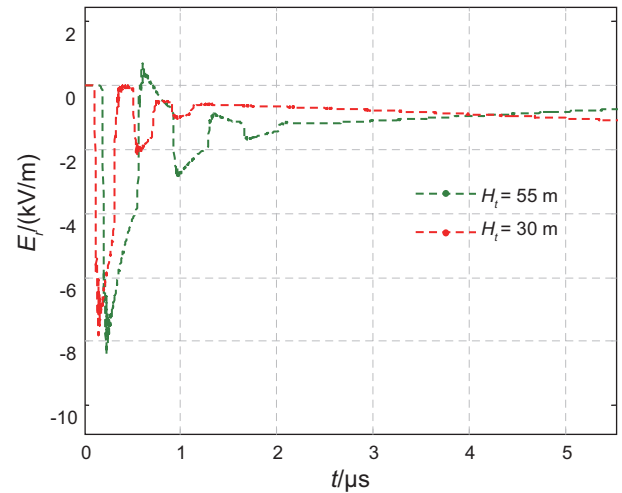
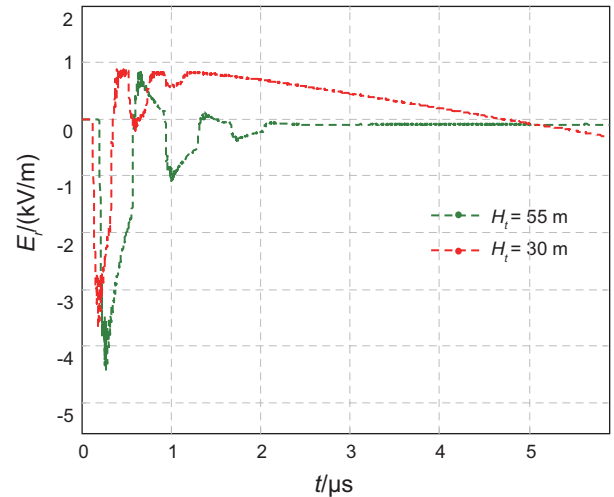


图 3 石化装置顶部发生反射的雷电流波形

Fig. 3 Lightning current reflection waveform at the top of the petrochemical plant



a) 距离置 10 m 处,地面上方 2 m 的水平电场



b) 距离装置 20 m,地面上方 2 m 的水平电场

图 4 雷击不同高度的石化装置在位置处的水平电场

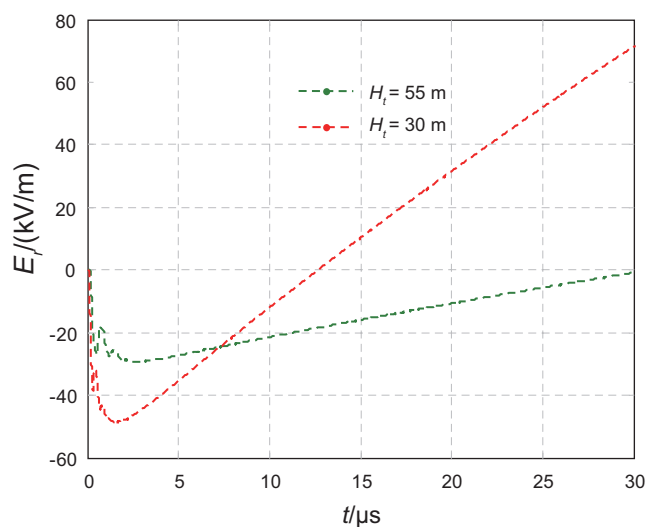
Fig. 4 Horizontal electric field produced by lightning strike at different heights

可以看出,当石化装置遭受雷击的瞬间,观测点的电场值快速增大,随后快速振荡减小,逐渐趋于平缓,造成波形快速振荡的主要原因是石化装置对雷电的反射作用。水平电场受石化装置高度的影响较小,30 m 和 55 m 石化装置的雷击水平电场相差不到 1 kV/m。水平电场受距离影响较大,雷击 55 m 石化装置在 10 m 处的水平电场达到了 8 kV/m 以上,而 20 m 处的水平电场仅为 3.5 kV/m 左右。

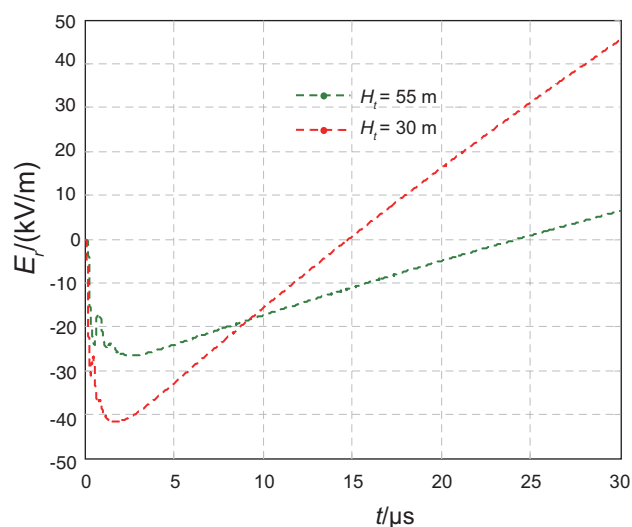
图 5 为雷击不同高度石化装置垂直电场分布情况,

可以看出,垂直电场受石化装置高度的影响很大而受观测点距离的影响较小。雷击 55 m 石化装置在 10 m 处产生的垂直电场近 50 kV/m,而雷击 33 m 石化装置在相同位置产生的电场仅不到 30 kV/m。雷击相同高度的石化装置,在 10 m 和 20 m 处产生的垂直电场仅相差几千伏/m。

图 6 为雷击不同高度石化装置垂直电场分布情况,可以看出,由于石化装置对雷电的反射作用,水平磁场前期波动较大,与雷电流反射一致性较好。从波形



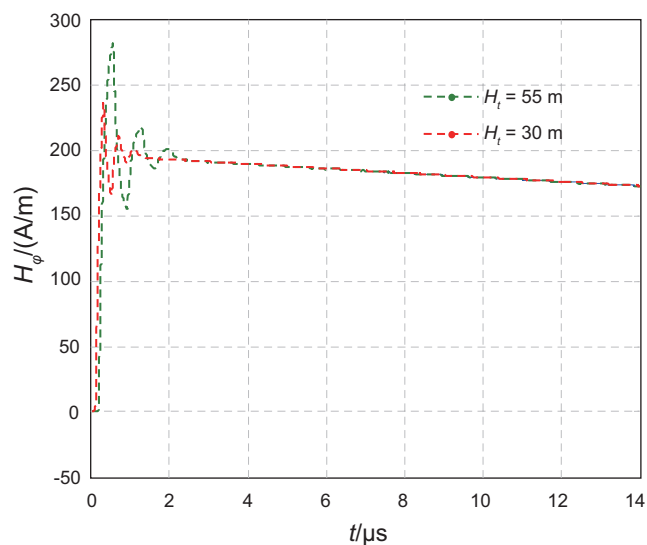
a) 距离装置 10 m 处,地面上方 2 m 的垂直电场



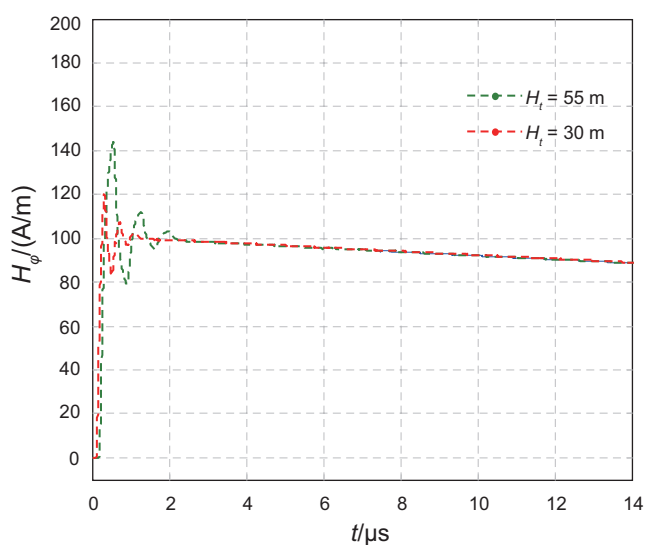
b) 距离装置 20 m 处,地面上方 2 m 的垂直电场

图 5 雷击石化装置不同距离处地面附近垂直电场

Fig. 5 Vertical electric field produced by a lightning strike on the petrochemical plant



a) 距离装置 10 m 处,地面上方 2 m 的水平磁场



b) 距离装置 20 m 处,地面上方 2 m 的水平磁场

图 6 雷击石化装置不同距离处地面附近水平磁场

Fig. 6 Horizontal electric field produced by a lightning strike on the petrochemical plant

中还可以看出,水平磁场受石化装置高度和距离的影响都较大。

4 结论与建议

通过以上计算结果可知,在100 kA强雷电情况下,在地上5 m,距离雷电通道10 m处的水平电场峰值达到了110 kV/m以上,垂直电场峰值达到了240 kV/m以上,水平磁场峰值达到了2 300 A/m以上。如果钻井井场的防雷工程不完善,如此强大的雷电电磁脉冲很容易对石化装置的动力、井控、仪表等系统造成破坏,严重威胁着企业安全生产和人员生命安全。

为了确保石化装置的安全运行,针对石化装置的实际运行情况,提出了以下防雷措施:

(1)完善防雷接地装置,确保石化装置、机房、设备接地良好,各个系统的接地宜采用共用接地系统。

(2)屏蔽线缆的屏蔽层两端应做可靠接地、等电位连接;其余线缆应穿金属管或金属线槽敷设,并将金属管或跨接后线槽的两端做可靠接地。

(3)低压供电系统中应安装多级浪涌保护器,将残压控制在最低水平。信息系统信号部分应在信号线两端的接口处安装相应的信号浪涌保护器,以确保信号系统安全。

参考文献

- [1] 熊和志,乔会东.石化装置及其内部建筑物的防雷设计与应用[J].石油化工自动化,2007,4(19):19-23. [XIONG H Z, QIAO H D. The design of protection for petrochemical devices and structure against lightning and its application[J]. Automation in Petrochemical Industry, 2007, 4(19): 19-23.]
- [2] DIENDORFER G, UMAN M A. An improved return stroke model with specified channel-base current[J]. Geophysics Research, 1990, 95: 13621-13644.
- [3] RUBINSTEIN M. An approximate formula for the calculation of the horizontal electric field from lightning at close, intermediate, and long range[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1996, 38(3):531-535.
- [4] COORAY V, SCUKA V. Lightning-induced overvoltages in power lines: validity of various approximations made in overvoltage calculations[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1998, 40(4):355-363.
- [5] NORTON K A. The propagation of radio waves over the surface of the earth and in the upper atmosphere[J]. Proceedings of the Institute of Radio Engineers, 1937, 25(9):1203-1236.
- [6] RAKOV V A, DULZON A A. Calculated electromagnetic fields of lightning return stroke[J]. Journal of Geophysical Research, 1987(1): 87-89.
- [7] YANG C S, ZHOU B H. Calculation methods of electromagnetic fields very close to lightning[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2004, 46(1):133-141.
- [8] 杨春山. 地闪电磁脉冲研究[D]. 南京: 解放军理工大学博士学位论文, 2003. [YANG C S. Research on lightning electromagnetic pulse (LEMP) fields of lightning under the ground[D]. Nanjing: PLA University of Science and Technology Doctoral Dissertations, 2003]
- [9] 葛德彪, 闫玉波. 电磁波时域有限差分方法[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002. [GE D B, YAN Y B. Finite-difference time-domain method for electromagnetic waves[M]. Xi'an: Xi'an Electronic Science & Technology University Press, 2002.]
- [10] YANG B, ZHOU B H, GAO C, et al. Using a two-step finite-difference time-domain method to analyze lightning-induced voltages on transmission lines[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2011, 53(1):256-260.

Research into the electromagnetic pulse risk of a petrochemical plant struck by lightning

BI Xiaolei^{1,2}, LIU Quanzhen^{1,2}, YU Haiyan³, LIU Baoquan^{1,2}, GAO Xin^{1,2}, LIU Juan^{1,2}, JIANG Hui^{1,2}, GAO Jian^{1,2}

1 SINOPEC Research Institute of Safety Engineering, Qingdao 266071, China

2 State Key Laboratory of Chemical Safety, Qingdao 266071, China

3 State Grid Shandong Electric Power Company Rongcheng Power Supply Company, Rongcheng 264300, China

Abstract We analyzed the possible lightning electromagnetic pulse (LEMP) caused by a lightning strike on a petrochemical plant, based on the modified transmission line model with linear current decay with height. The LEMP caused by a lightning strike with a 100 kA lightning current was calculated using the finite-difference time-domain (FDTD) method. The results indicate that the overground waveform of the horizontal electric field varies greatly because of the influence of ground reflection, while the underground waveform changes slightly, primarily a change in magnitude. The difference of the vertical electric field amplitude between above the ground and below the ground is very large, and the overground waveform change slightly with height, and the first peak of the underground waveform reduces with an increment of depth, but the second peak increases with an increment of depth because of the influence of ground reflection. The horizontal magnetic field changes regularly, which below ground changes slightly with height and decreases with the increment of distance to the lightning channel, but the underground horizontal magnetic field decays smoothly with an increment of depth. At a height of 10m above ground, the peak of the horizontal electric reaches more than 110 kV/m at 10 m away from the lightning channel, the vertical electric field reaches 240 kV/m, the horizontal magnetic field reaches 230 0 A/m, and the powerful LEMP is a severe test to lightning protection design of petrochemical enterprises.

Keywords lightning strike; petrochemical plant; LEMP; FDTD

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2016.03.035

(编辑 付娟娟)