

电磁兼容

# 变电站地电位差对屏蔽电缆的电磁干扰分析\*

吴茂林, 崔翔

(华北电力大学电气工程学院, 保定 071003)

**摘要:** 基于多导体传输线频域方法提出了一种电缆上干扰电压和电流的数值计算方法。实验验证了该方法的有效性,并计算了雷击某 500 kV 变电站接地网时瞬态地电位差在低压直流电缆上产生的干扰电压和电流,计算结果表明该干扰电压和电流不可忽视。

**关键词:** 变电站; 瞬态地电位差; 傅里叶变换; 多导体传输线

**中图分类号:** TM77      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1003-6520(2005)03-0053-03

## Analysis of Electromagnetic Interference in Shielded Cables Caused by Ground Potential Difference in Substations

WU Maolin, CUI Xiang

(Department of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** This paper presents a numerical method calculating the interference voltage. The experiment in the paper verifies the validity of the numerical method. The paper calculates the interference voltages and currents in the low-voltage DC cable caused by the ground potential difference that is caused when the lightning current strikes directly a 500 kV substation, the calculated result shows that the interference voltages and currents couldn't be ignored.

**Key words:** substation; transient ground potential difference; Fourier transformation; multi conductor transmission lines

### 0 引言

有雷电流或故障电流时大型接地网是不等电位的<sup>[1]</sup>,在接地网上任意两点间电位差较大。接地网地电位差在双端接地电缆屏蔽层中产生电流,芯线上产生干扰电压,造成相关二次设备的电磁干扰。因此,研究变电站接地网电位差对两端接地屏蔽电缆的电磁影响有重要的学术意义和工程实用价值。

本文基于多导体传输线频域法<sup>[2]</sup>提出了一种电缆上干扰电压和电流的数值计算方法,并计算分析了雷击某 500 kV 变电站接地网时瞬态地电位差在低压直流电缆上产生的干扰电压和电流。

### 1 计算方法

图 1 为 500 kV 变电站中主控制室与保护小室之间存在直流电缆的连接图,其中  $E$ 、 $Z_s$  和  $Z_L$  分别为直流电压源、电压源内阻抗和负载阻抗。当雷击变电站接地网时,在 B、A 两点间产生的瞬态地电位差将在双端接地电缆屏蔽层中产生电流,在芯线上产生干扰电压,造成对相关二次设备的电磁干扰。为了研究此电磁干扰,建立了图 2 多导体传输线模型,

图中  $U_{BA}(t)$  为雷击变电站接地网时在电缆屏蔽层两端接地点间产生的地电位差; $Z_{BA}$  为屏蔽层两端接地点间接地网的等效阻抗。

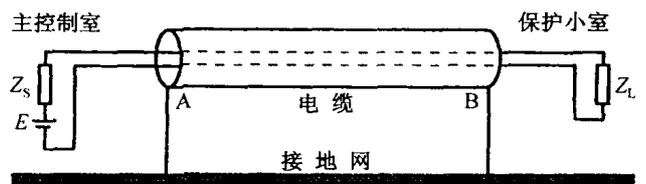


图 1 直流电缆连接图

Fig. 1 DC cable connection diagram

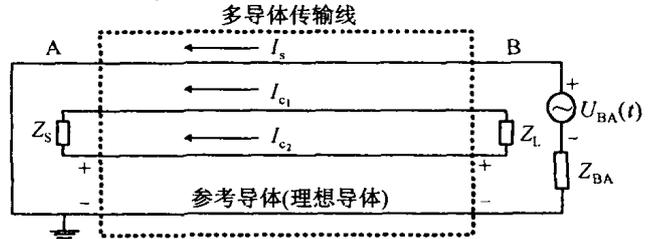


图 2 直流电缆的多导体传输线模型

Fig. 2 Multi-conductor transmission lines model for DC cable

设带屏蔽层的电缆有  $N$  根芯线,芯线与屏蔽层间电压相量为  $U_1 \cdots U_N$ ,屏蔽层与外部参考导体间电压相量为  $U_{N+1}$ ;芯线与屏蔽层组成的回路中回路电流相量为  $I_1 \cdots I_N$ ,屏蔽层与外部参考导体组成的

\* 国家自然科学基金资助项目(50077006);高等学校骨干教师资助计划

回路中回路电流相量为  $I_{N+1}$ 。此为多导体传输线，其电压和电流相量的关系为<sup>[2]</sup>：

$$-\begin{bmatrix} dU_1/dx \\ \vdots \\ dU_N/dx \\ dU_{N+1}/dx \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & \cdots & Z_{1N} & -Z_t \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ Z_{N1} & \cdots & Z_{NN} & -Z_t \\ -Z_t & \cdots & -Z_t & Z_{(N+1)(N+1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_N \\ I_{N+1} \end{bmatrix}; \quad (1)$$

$$-\begin{bmatrix} dI_1/dx \\ \vdots \\ dI_N/dx \\ dI_{N+1}/dx \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{1N} & Y_t \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ Y_{N1} & \cdots & Y_{NN} & Y_t \\ Y_t & \cdots & Y_t & Y_{(N+1)(N+1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ \vdots \\ U_N \\ U_{N+1} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中,  $x$  为电压和电流相量的传输方向;  $Z_t$  为屏蔽层对芯线的转移阻抗;  $Z_{kk}$  ( $k=1, 2, \dots, N$ ) 为第  $k$  根芯线的自阻抗;  $Z_{km}$  ( $k, m=1, 2, \dots, N, k \neq m$ ) 为第  $k$  根芯线与第  $m$  根芯线间的互阻抗;  $Z_{(N+1)(N+1)}$  为屏蔽层对外部参考导体的阻抗;  $Y_{ij}$  ( $i, j=1, 2, \dots, N$ ) 为第  $k$  根芯线以屏蔽层为参考导体时的自导纳;  $Y_{(N+1)(N+1)}$  为屏蔽层与外部参考导体间的导纳;  $Y_t$  为屏蔽层对芯线的转移导纳。

以外部参考导体为整个系统的参考导体且设芯线与外部参考导体间电压相量为  $U_d \cdots U_{cN}$ , 芯线内电流相量为  $I_d \cdots I_{cN}$ , 屏蔽层与外部参考导体间电压相量为  $U_s$ , 屏蔽层内电流相量为  $I_s$ , 则有如下关系:

$$\left. \begin{array}{l} U_{d1} = U_1 + U_{N+1} \\ \vdots \\ U_{cN} = U_N + U_{N+1} \\ U_s = U_{N+1} \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} I_{d1} = I_1 \\ \vdots \\ I_{cN} = I_N \\ I_s = I_{N+1} - \sum_{i=1}^N I_i \end{array} \right\}, \quad (3)$$

利用式(1)、(2)、(3)得:

$$-\begin{bmatrix} dU_{d1}/dx \\ \vdots \\ dU_{cN}/dx \\ dU_s/dx \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & \cdots & Z_{1N} & Z'_{(N+1)1} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ Z_{N1} & \cdots & Z_{NN} & Z'_{N(N+1)} \\ Z_{(N+1)1} & \cdots & Z_{(N+1)N} & Z'_{(N+1)(N+1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{d1} \\ \vdots \\ I_{cN} \\ I_s \end{bmatrix}; \quad (4)$$

$$-\begin{bmatrix} dI_{d1}/dx \\ \vdots \\ dI_{cN}/dx \\ dI_s/dx \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{1N} & Y'_{1(N+1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ Y_{N1} & \cdots & Y_{NN} & Y'_{N(N+1)} \\ Y'_{(N+1)1} & \cdots & Y'_{(N+1)N} & Y'_{(N+1)(N+1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{d1} \\ \vdots \\ U_{cN} \\ U_s \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中:

$$Z'_{ij} = Z_{ij} + Z_{(N+1)(N+1)} - 2Z_t, \quad i, j=1, 2, \dots, N;$$

$$Z'_{k(N+1)} = Z_{(N+1)k} = Z_{(N+1)(N+1)} - Z_t, \quad k=1, 2, \dots, N;$$

$$Z'_{(N+1)(N+1)} = Z_{(N+1)(N+1)}; Y'_{(N+1)k} = Y_t - \sum_{i=1}^N Y_{ik}, \quad k=1, 2, \dots, N;$$

$$Y'_{k(N+1)} = Y_t - \sum_{i=1}^N Y_{ki}, \quad k=1, 2, \dots, N;$$

$$Y'_{(N+1)(N+1)} = Y_{(N+1)(N+1)} - 2NY_t + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N Y_{ij}.$$

加上端部条件后, 利用多导体传输线频域方法对式(4)、(5)求解。

## 2 实验验证

为验证方法的有效性, 建立了图3的实验。

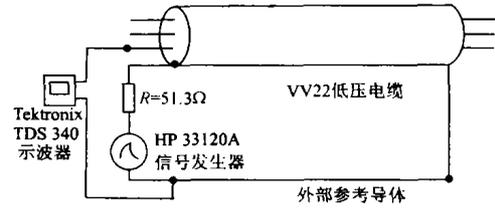


图3 实验接线图

Fig. 3 Experiment connection diagram

图3中的电缆为 VV22 三芯低压电缆, 3 根芯线对称分布, 电缆长 10 m, 单根芯线的截面面积  $50 \text{ mm}^2$ , 外部参考导体为一半径  $0.5 \text{ mm}$  的铜导线, 该铜导线外面有  $0.5 \text{ mm}$  厚的绝缘层。用 HP33120A 信号发生器通过  $51.3 \Omega$  的电阻给电缆屏蔽层与外部参考导体间施加图4的双指数电压波形, 用 Tektronix TDS340 示波器测量电缆芯线和电缆屏蔽层对外部参考导体的电压波形见图5实线。

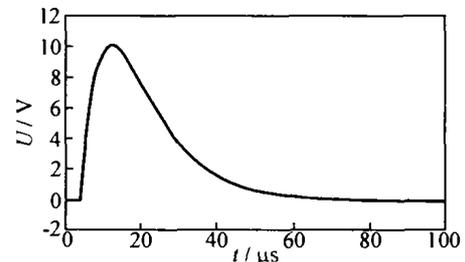


图4 信号发生器产生的电压波形

Fig. 4 Voltage shape generated by signal generator

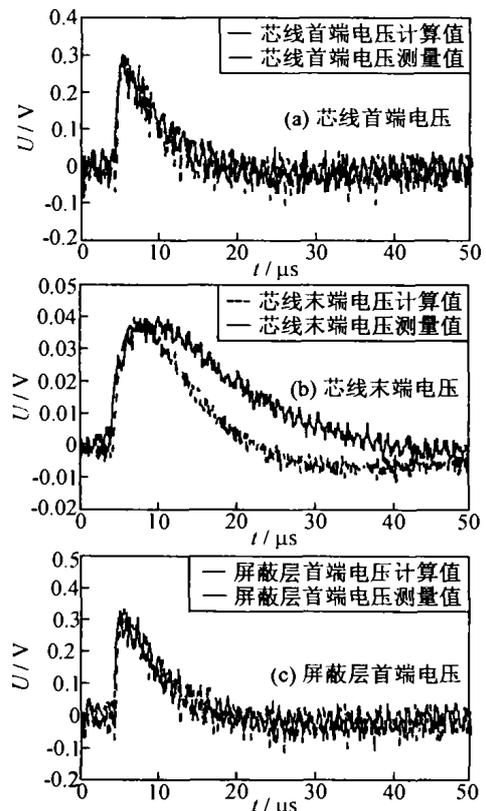


图5 电缆芯线和屏蔽层上的电压

Fig. 5 Voltage in cable cores and shielding layer

计算时,将信号发生器产生的电压波形进行傅立叶变换,获得该电压波形的频谱;然后利用本文方法计算得到电缆芯线和屏蔽层上的电压响应频谱;最后进行傅立叶反变换,得到电缆芯线和屏蔽层上各个瞬态电压波形,见图5虚线。

由图5可见,计算结果与测量结果基本一致,说明本文的计算方法有效。

### 3 实际应用

某500 kV变电站接地网长303 m,宽265 m,埋设深度0.6 m,整个接地网全部由扁钢制作,见图6,其电阻率 $\rho$ 为 $1.702 \times 10^{-7} \Omega\text{m}$ ,相对导磁率 $\mu$ 为636.12,横截面为 $3.408 \text{ cm}^2$ 。由实测 $\rho$ 数据对 $\rho$ 建模得表1三层水平分层土壤模型。

图6中A点是电缆屏蔽层在主控制室的接地端,B、C和D点分别是电缆屏蔽层在位于开关场内保护小室的接地端。I点是B点处保护小室附近避雷针的位置。当雷击该避雷针时,由于接地网的不等电位,在A、B、C、D点处产生不同的瞬态地电位升,各点间存在瞬态地电位差。

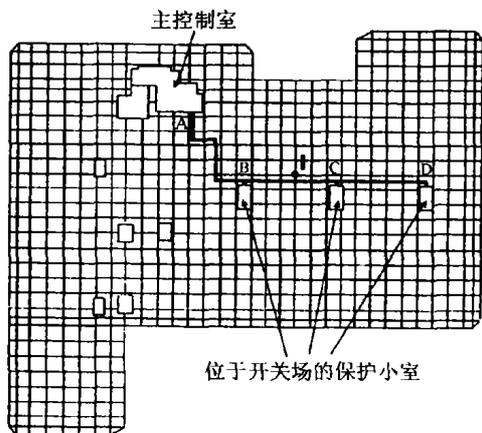


图6 某500 kV变电站接地网  
Fig. 6 Ground grid of a 500 kV substation

表1 土壤电阻率模型  
Tab. 1 Model for soils resistivity

层次	1	2	3
土壤电阻率/ $\Omega\text{m}$	36.302	109.349	670.683
厚度/m	9.043	85.218	$\infty$

现讨论B、A两点间83.5 m长的VV22两芯低压直流电缆。电缆 $Z_s=0.01 \Omega$ , $Z_l=150 \Omega$ ,芯线材料为铜, $\rho=1.754 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$ ,单根芯线的截面面积 $50 \text{ mm}^2$ ,单位长直流电阻 $3.509 \times 10^{-4} \Omega/\text{m}$ ;屏蔽层为钢制, $\rho=1.702 \times 10^{-7} \Omega\text{m}$ ,屏蔽层内径9.4 mm,外径9.6 mm,单位长直流电阻 $1.426 \times 10^{-2} \Omega/\text{m}$ 。该电缆屏蔽层在A、B两点分别接地。

2.6/40  $\mu\text{s}$ 、30 kA的雷电流注入图6 I点时,B、A两点间产生的开路电压(即作用于电缆屏蔽层两

接地点的开路电压)可借助于变电站接地网的频域分析方法<sup>[3~6]</sup>和快速傅立叶变换计算获得。B、A间的等效阻抗用文<sup>[4,5]</sup>方法算得。两芯VV22电缆的芯线截面形状近似半圆,电缆架设于电缆沟内。利用有限元法<sup>[7]</sup>求得该电缆的单位长度参数。

以A点电位为参考点,利用本文方法对图2模型计算,得到A点处电缆芯线的电压、B点处电缆芯线和屏蔽层的电压以及它们之间的电压差,见图7。与这些电压相对应的最大电压绝对值分别为B、A点间地电位差5.304 kV;B点屏蔽层电压4.600 kV;B点芯线电压3.365 kV;B点芯线与屏蔽层间电压1.904 kV;A点芯线电压1.904 kV。图8为B点处电缆屏蔽层内的电流,其最大值479.02 A。

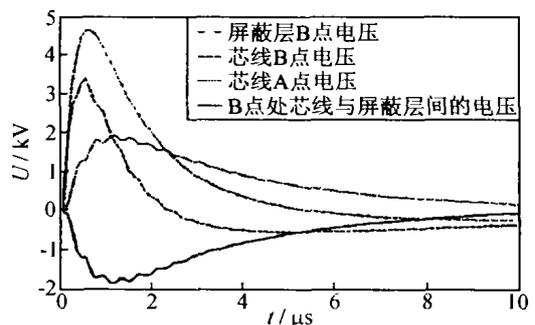


图7 电缆上的干扰电压

Fig. 7 Interference voltage in cable

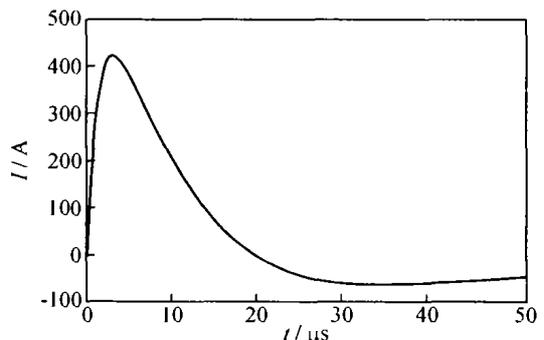


图8 B点处电缆屏蔽层内的电流

Fig. 8 Current in shielding layer of cable at point B

由上述计算可知,当2.6/40  $\mu\text{s}$ 、30 kA的雷电流流入500 kV变电站接地网时,在保护小室侧及主控制室侧直流电缆屏蔽层B、A处,电缆芯线与电缆屏蔽层间产生的干扰电压的最大绝对值为1.904 kV;这两个电压值都小于但很接近IEC61000-4-5浪涌抗扰度标准规定的2 kV(3级)限值,在工程上不可忽视。同时,由于地电位差的作用而在直流电缆屏蔽层内产生的电流达到479.02 A,该电流可能对电缆造成危害,在工程上应重视。

### 4 结论

当2.6/40  $\mu\text{s}$ 、30 kA的雷电流直击某500 kV  
(下转第60页)

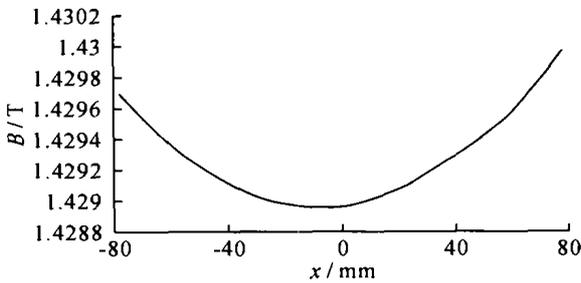


图 8 螺线管磁场径向分布(z=300 mm 时)

Fig. 8 Radial distribution of magnetic field of solenoid(when z=300 mm)

由图 6 可知,在轴线上磁场的大小、位形与理论设计基本吻合,各部分间隔处的磁场亦得到了补偿。由图 7、8 可知,磁场在轴向上的均匀度>90%,而在

(上接第 47 页)

N 的多少和 R<sub>0</sub> 的大小应综合考虑,以取得最佳的 B、响应灵敏度、稳定性和线性度。根据以上理论分析和实测数据,本文设计了一个电流传感器。为了检测传感器的幅频特性,分别在传感器的输入信号端输入正弦、方波和三角波信号,用示波器观测记录。图 6 是用 Tektronix 公司的 Wave Star 软件捕捉到的波形,其中 CH1、CH2 分别为输入、输出信号。此传感器的 f<sub>L</sub> 约 10 kHz, f<sub>H</sub> 达 2.8 MHz,可见其幅频特性响应较理想,满足变压器局放在线监测传感器频宽要求。

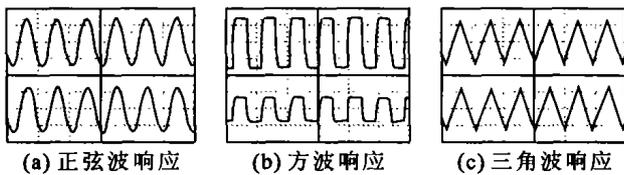


图 6 传感器输入输出信号波形

Fig. 6 Input and output signal oscillogram of the sensor

(上接第 55 页)

变电站接地网时,在低压直流屏蔽电缆屏蔽层两端接地点间产生地电位差,该电位差在低压直流电缆上造成了干扰,利用本文提出的方法计算其干扰。计算结果表明,变电站接地网地电位差在该低压直流电缆上产生的干扰不可忽视,工程上应引起重视。

### 参 考 文 献

[1] Xiang Cui, Lin Li, Tiebing Lu, et al. Analysis of the potential distribution generated by a direct lightning strike in a 500 kV substation[C]. EMC Zurich01, Zurich, 2001: 149-152.

[2] C R Paul. Analysis of multiconductor transmission lines[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1994.

[3] Frederick M Tesche, Michel V Ianoz, Torbjörn Karlsson. EMC Analysis Methods and Computational Models[M]. New York: John Wiley &

径向上的均匀度>99%,与前面的技术要求及理论设计结果十分相符。

### 5 结 束 语

在分析电容储能器脉冲磁场的基础上,采用计算机辅助设计和仿真分析相结合的方法,设计的磁场系统可产生满足要求的脉冲磁场。该法对其它磁场的设计与分析有一定的参考价值。

### 参 考 文 献

[1] 张宝裕,刘恒基. 磁场的产生[M]. 北京:机械工业出版社,1987. (收稿日期 2004-08-31)

罗光耀 1976 年生,硕士生,研究方向为电磁场和脉冲功率技术。电话:(0816)2485556, E-mail: hitlgy@163.com

### 4 结 语

在传感器线圈尺寸和铁心材料一定条件下,改变线圈匝数和取样电阻大小可获得不同的幅频响应。线圈匝数为 65~78,取样电阻约 0.92 kΩ 时有较理想的工作频带宽度和灵敏度,所设计的传感器可用于变压器局放在线监测。

### 参 考 文 献

[1] 吴广宁. 大型发电机故障放电在线监测及诊断技术[M]. 成都:西南交通大学出版社,2001.

[2] 葛景涛,邱昌容,谢恒堃. 局部放电测量[M]. 北京:机械工业出版社,1984.

[3] 马翠娇,黄新红,邱毓昌,等. 局部放电检测用宽频带电流传感器的探讨[J]. 高压电器,2001,37(1):24-26.

(收稿日期 2004-07-17)

赵来军 1980 年生,硕士生,主要从事高压电气设备局部放电在线监测的研究。

Sons, Inc., 1996.

[4] Bo Zhang, Zhibin Zhao, Xiang Cui, et al. Diagnosis of breaks in substation's grounding grid by using the electromagnetic method[J]. IEEE Trans on Magnetics, 2002, 38(2): 473-476.

[5] 张波,崔翔,赵志斌,等. 大型变电站接地网的频域分析方法[J]. 中国电机工程学院,2002,22(9):59-63

[6] 吴茂林,崔翔. 雷击 500 kV 变电站暂态地电位差的计算[J]. 高电压技术,2002,28(6):1-3.

[7] 崔翔. 应用有限元方法计算含有电位悬浮导体的电场分布[J]. 华北电力学院学报,1995,22(2):1-7.

(收稿日期 2004-05-10)

吴茂林 1974 年生,博士,讲师,毕业于华北电力大学,主要从事电力系统电磁兼容的研究。

崔翔 1960 年生,教授,博导,从事电磁场理论及其应用,光纤传感与传输技术和电力系统电磁兼容研究。电话:(0312)7523031