

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.02.007

带散射体的电力系统多级传输线高频耦合模型

郑群爽, 郭俊, 谢玮琛, 谢彦召

(西安交通大学电气工程学院(电工材料电气绝缘全国重点实验室), 陕西 西安 710049)

摘要: 高频电磁场会与架空输电线路产生耦合, 一旦高频电磁场的波长小于传输线的高度, 经典传输线理论就不再适用。传统的全波数值算法虽然可以解决这一问题, 但求解效率不高, 需要消耗大量的时间与计算资源。此外, 电力系统输电线路往往有多个垂直端, 线路布局复杂, 而以往针对电力系统传输线的高效求解研究都是只有左右两个垂直端的较为简单的模型, 与实际电力系统传输线的结构不符, 没有考虑中间带有垂直端的情况。为了解决这些问题, 文中提出一种理论有效的方法来解决有损耗地面上方带有散射体的电力系统多级传输线的高频电磁场耦合问题。采用计算效率高的渐近法, 并在渐近法中引入散射体的概念, 以考虑更复杂的电路结构。最后通过数值算例验证了该方法的准确性和有效性。

关键词: 电力系统多级传输线; 渐近法; 高频电磁场; 全波数值算法; 散射体; 有损耗地面

中图分类号: TM75

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2024)02-0065-08

0 引言

高空电磁脉冲是目前的研究热点, 其诱发的电流可能远远超过电力系统输电线路的基本绝缘等级, 从而诱发绝缘闪络或绝缘损坏^[1-5]。距离地面 400 km 高度产生的高空电磁脉冲最大电场强度为 39 kV/m, 覆盖范围可达 2 200 km。通过传输线理论以及基于麦克斯韦方程的天线理论, 针对高空电磁脉冲与传输线的耦合过程进行分析, 可以得到, 大范围强电磁脉冲会在 35 kV 及以下输配电线路上耦合产生过电压, 引起线路绝缘子串闪络, 直接威胁到电网的安全稳定。高空电磁脉冲在架空输配电线路上感应出的暂态脉冲具有上升时间快, 持续时间短的特点。高空电磁脉冲波形作用下的绝缘子串闪络电压与标准雷电波形下的闪络电压有一定关系, 其中 25/300 ns 波形下绝缘子串闪络电压为 1.2/50 μ s 标准雷电波形闪络电压的 1.5 ~ 2.0 倍^[6]。架空输电线路是所有电气系统的主要组成部分之一^[7-12]。因此, 对高空电磁脉冲作用下的电力系统传输线进行预测十分必要。

在经典传输线理论的基础上, 国内外学者针对沿线电流响应进行了大量研究。文献[13]介绍了低频情况下场线耦合问题的部分经典传输线模型。文献[14]提出一种高效的时域混合算法, 很好地解决了有损耗层上传输线电磁耦合建模困难的问题。文献[15]采用基于多导体传输线模型的时域有限差分算法, 对模型端口处的离散差分运算进行近似

处理, 提出新型简化时域有限差分算法, 为暂态分析提供技术手段。文献[16]证明了非均匀传输线模型更符合海上风机防雷的实际情况。文献[17]提到在高频情况下, 由于泄漏效应与辐射效应不可忽略, 经典传输线理论会产生很大的误差, 且使用全波数值算法求解高频响应会消耗大量的时间与计算机内存。由于经典传输线理论不适用于求解高频电磁干扰辐射下场线耦合问题, 文献[18]介绍了一种基于天线理论和模拟行为建模的时域传输线全波建模方法。

针对高频响应, 文献[20]提出一种渐近法, 可高效处理有损耗地上传输线的高频电磁场耦合问题。文献[22]采用模量变换矩阵将这种方法推广应用到多导体中。但是这种方法只能处理只有 2 个垂直端的简单传输线情况, 而实际电力系统传输线往往由多个垂直端构成。

文中进一步发展渐近法, 从散射体^[23]的角度考虑直线中间有垂直端点的情况, 给出远离垂直端的传输线的电流解析表达式, 考虑中间垂直端处的透射系数和反射系数, 使得渐近区域的表达式更加充分和实用。文中从电力系统多级传输线模型角度出发, 介绍电力系统多级传输线渐近法原理, 并通过实际算例验证该方法的准确性与高效性。

1 考虑散射体的多级电力系统传输线结构

图 1 为一个有损耗地面上方受到外部高频电磁场激励的多级电力系统传输线结构, 其由一个半径为 r 、高度为 h 、长度为 $2L$ 的架空无损导线组成。终端载荷左端为 Z_1 , 中间垂直端为 Z_2 , 右端为 Z_3 。地

收稿日期: 2023-09-12; 修回日期: 2023-11-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52207015)

面处于不完全导电状态,地面相对介电常数、磁导率和电导率分别为 $\epsilon_g, \mu_0, \sigma_g$ 。外部空气介电常数为 ϵ_0 ,磁导率为 μ_0 ,电导率为 0。电磁场为均匀平面波,向量 $\vec{E}, \vec{k}, \vec{H}$ 分别为平面波^[19]的电场强度、波矢和磁场强度,仰角为 φ ,极化角为 α ,方位角为 θ 。

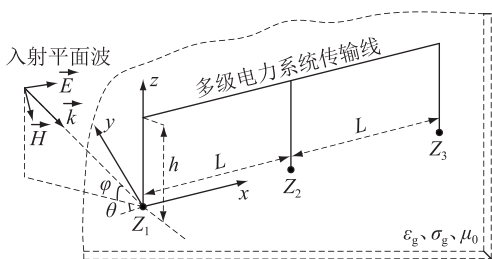


图1 多级电力系统传输线结构
Fig.1 Structure of multilevel power system transmission line

将中间垂直端当作散射体进行处理。散射体的反射系数和透射系数只与线路的首尾端阻抗、线路的特性阻抗、散射体的长度及散射体的参考点距离散射体首尾端的长度有关^[23]。选择垂直端 2 作为散射体的参考点,参考点左右长度为 L_b ($L_b = 2h$) 的区域作为散射体的范围。图 2 中,圆形框表示散射体, L_{ref} 为散射体的范围,反射系数 $R_2^- = R_2^+$,透射系数 $P_2^+ = P_2^-$,“+”表示方向朝右侧,“-”表示方向朝左侧。对于固定格式的散射体,其反射系数和透射系数固定,与散射体位于线路的位置无关。

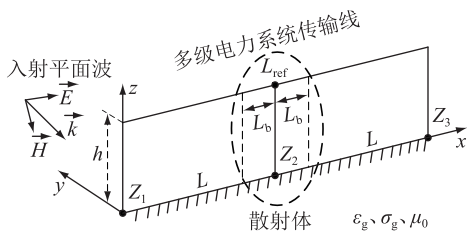


图2 垂直端 2 作为散射体
Fig.2 Vertical end 2 as a scatterer

电流经过散射体时会发生多次透射与反射,故引入总反射系数 $R_{2\Sigma}^-$ 和总透射系数 $P_{2\Sigma}^+$ 以简化求解过程。假设有一电流经过散射体的时候,部分被反射,部分被透射,到达线路末端以后,又被反射回来,经过散射体时再次发生透射与反射,此后重复这一过程,如图 3 所示。图中, $I_0 e^{-j\gamma L}$ 为到达散射体处的初始电流; R_3^- 为垂直端 3 处的反射系数。由图可以得到式(1)、式(2)。

$$R_{2\Sigma}^- = R_2^- + P_2^+ e^{-j\gamma L} R_3^- \sum_{n=0}^{\infty} (e^{-j\gamma L} R_2^+ e^{-j\gamma L} R_3^-)^n e^{-j\gamma L} P_2^- = R_2^- + \frac{P_2^+ R_3^- P_2^- e^{-2j\gamma L}}{1 - R_2^+ R_3^- e^{-2j\gamma L}} \quad (1)$$

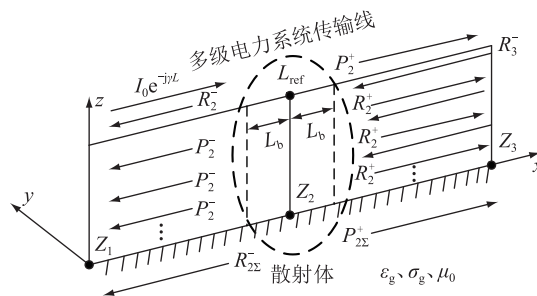


图3 电流经过散射体时的反射与透射过程

Fig.3 The process of reflection and transmission of current through the scatterer

$$P_{2\Sigma}^+ = P_2^+ \sum_{n=0}^{\infty} (e^{-j\gamma L} R_3^- e^{-j\gamma L} R_2^+)^n = \frac{P_2^+}{1 - R_3^- R_2^+ e^{-2j\gamma L}} \quad (2)$$

式中: γ 为传播常数; n 为这一过程重复次数。

同理可得:

$$R_{2\Sigma}^+ = R_2^+ + P_2^- e^{-j\gamma L} R_1^+ \sum_{n=0}^{\infty} (e^{-j\gamma L} R_2^- e^{-j\gamma L} R_1^+)^n e^{-j\gamma L} P_2^+ = R_2^+ + \frac{P_2^- R_1^+ P_2^+ e^{-2j\gamma L}}{1 - R_2^- R_1^+ e^{-2j\gamma L}} \quad (3)$$

$$P_{2\Sigma}^- = P_2^- \sum_{n=0}^{\infty} (e^{-j\gamma L} R_1^+ e^{-j\gamma L} R_2^-)^n = \frac{P_2^-}{1 - R_1^+ R_2^- e^{-2j\gamma L}} \quad (4)$$

式中: R_1^+ 为垂直端 1 处的反射系数。

2 多级电力系统传输线渐近法

由于导体被认为是无损的,故沿 x 轴方向的总电场为 0,即:

$$E_x^e(x) + E_x^s(x) = 0 \quad (5)$$

式中: $E_x^e(x)$ 为激励场的分量的值; $E_x^s(x)$ 为散射场的分量的值。

散射场的表达式如下:

$$E_x^s(x) = -j\omega A_x(x) - \frac{\partial \varphi(x)}{\partial x} \quad (6)$$

其中:

$$A_x(x) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_0^L I(x') g(x, x') dx' \quad (7)$$

$$\varphi(x) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_0^L q(x') g(x, x') dx' \quad (8)$$

式中: ω 为入射波的角频率; $q(x')$ 为沿线分布的电荷; $I(x')$ 为沿线分布的电流; $g(x, x')$ 为格林公式。

电荷分布与电流之间的关系如下:

$$q = -\frac{1}{j\omega} \times \frac{dI}{dx} \quad (9)$$

结合式(8)、式(9),可以得到:

$$\varphi(x) + \frac{1}{4\pi\epsilon_0 j\omega} \int_0^L \frac{\partial I(x')}{\partial x} g(x, x') dx' = 0 \quad (10)$$

结合式(5)一式(7),可以得到:

$$\frac{\partial \varphi(x)}{\partial x} + j\omega \frac{\mu_0}{4\pi} \int_0^L I(x') g(x, x') dx' = E_x^e(x) \quad (11)$$

为了简化问题,采用传输线理论,当传输线截面与入射波满足 $kh \ll 1$ ($k = \omega/c$, c 为光速) 并且 $L \gg h$ 时,可以得到以下近似:

$$\int_0^L I(x') g(x, x') dx' \approx I(x) \int_0^L g(x, x') dx' \approx 2I(x) \ln(2h/r) \quad (12)$$

考虑式(12)以及标量电位和散射电压源 V^s 的定义,式(10)、式(11)可以简化如下:

$$\begin{aligned} \frac{dI(x')}{dx'} + \frac{4\pi\epsilon_0 j\omega}{2\ln(2h/r)} V^s(x) &= \\ \frac{dI(x')}{dx'} + j\omega C' V^s(x) &= 0 \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \frac{dV^s(x)}{dx} + \frac{j\omega\mu_0 2\ln(2h/r)}{4\pi} I(x) &= \frac{dV^s(x)}{dx} + \\ j\omega L' I(x) &= E_x^e(x) \end{aligned} \quad (14)$$

式中: L' 、 C' 分别为线路单位长度电感和单位长度电容。从式(13)、式(14)中可以得到参数 C' 、 L' 的表达式。

针对有损耗地面的情况,式(13)、式(14)可以表示如下:

$$\frac{dI(x')}{dx'} + Y' V^s(x) = 0 \quad (15)$$

$$\frac{dV^s(x)}{dx} + Z' I(x) = E_x^e(x) \quad (16)$$

$$\begin{cases} Y' = \frac{j\omega C' Y'_g}{j\omega C' + Y'_g} \\ Z' = j\omega L' + Z'_g \end{cases} \quad (17)$$

式中: Y' 、 Z' 分别为线路单位长度横向导纳和纵向阻抗; Z'_g 、 Y'_g 分别为地面损耗引起的等效阻抗和导纳。

根据苏德公式^[20]可以得到:

$$\begin{cases} Z'_g \approx \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1 + \sqrt{j\omega\mu_0(\sigma_g + j\omega\epsilon_g)h}}{\sqrt{j\omega\mu_0(\sigma_g + j\omega\epsilon_g)h}} \\ Y'_g \approx \frac{j\omega\mu_0(\sigma_g + j\omega\epsilon_g)}{Z'_g} \end{cases} \quad (18)$$

当外部激励为平面波的时候,导线受到的激励场可以表示为:

$$E_x^e(x, j\omega) = E(j\omega) e^{-jk_1 x \cos \theta} = E(j\omega) e^{-jk_1 x} \quad (19)$$

式中: $k_1 = k \cos \theta$; $E(j\omega)$ 为电场的函数。

渐近法可以半解析地求解理想导电地面上的电流响应,与全波数值算法相比,计算成本更低,计算效率更高。对于有损耗的导电接地,电流渐近法只能得到左右2个垂直端的感应电流。

在本节中,多级传输线的电流响应是半解析求解的。与以往只有左右端子在有损地面上的传输线相比,在求解过程中,增加了对中间垂直段的分析,考虑更为复杂,求解公式也有所不同。当电力系统传输线具有多级机构时,电流响应变得特别复杂。因此,为简化问题,如图4所示,将输电线路分为6个区域。左端对应的终端区域为I区($0 \leq x < L_b$),右端对应的终端区域为VI区($2L - L_b < x \leq 2L$)。中部垂直端左侧的终端区域为III区($L - L_b < x \leq L$),中部垂直端右侧对应的终端区域为IV区($L \leq x < L + L_b$)。区域II($L_b \leq x \leq L - L_b$)和区域V($L + L_b \leq x \leq 2L - L_b$)对应两级传输线各自的渐近区域。定义 L_b 为垂直端附近区域的长度,通常为直线最大高度 h 的2倍。

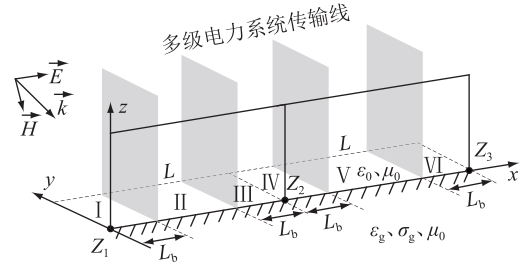


图4 多级电力系统传输线的6个分区

Fig.4 Six zones for multilevel power system transmission lines

随着辐射场频率的增加,当波长接近甚至小于传输线高度时,垂直端附近会发生辐射效应和泄漏效应,经典传输线理论不再适用。因此,在垂直端附近电流没有具体的表达式,但是垂直端附近的电流响应可以分步求解。然而,在渐近区域II和V中,由于距离垂直端较远,高频效应衰减得非常快,因此这2个区域可以渐近地视为2条无限长的电力系统传输线。

对于有损耗地面,利用考虑有损耗地面的传输线理论计算传播常数,则渐近区域II和V的电流表达式为:

$$I^a(x) = I_0^a e^{-jk_1 x} + I_1^a e^{-\gamma x} + I_2^a e^{\gamma x} \quad L_b \leq x \leq L - L_b \quad (20)$$

$$I^b(x) = I_0^b e^{-jk_1 x} + I_1^b e^{-\gamma x} + I_2^b e^{\gamma x} \quad L + L_b \leq x \leq 2L - L_b \quad (21)$$

$$\gamma = \sqrt{Z'Y'} \quad (22)$$

式中: $I^a(x)$ 、 $I^b(x)$ 分别为第一级和第二级传输线渐近区总电流; I_0^a 、 I_0^b 分别为第一级和第二级的平面波系数; I_1^a 、 I_1^b 分别为第一级和第二级的前行波系数; I_2^a 、 I_2^b 分别为第一级和第二级的反行波系数。根据文献[20],可以得到考虑右半无限长直线时的渐近区电流表达式:

$$I_{1\text{-asy}}^+(x) = I_0^a e^{-jk_1 x} + (R_1^+ I_2^a + S_1^+ I_0^a) e^{-\gamma x} + I_2^a e^{\gamma x} \quad (23)$$

式中: $I_{1\text{-asy}}^+(x)$ 为右半无限长传输线渐近区总电流; I_2^a 为从右往左流向垂直端 1 的假设电流; S_1^+ 为垂直端 1 处的散射系数。

考虑左半无限长直线时:

$$I_{3\text{-asy}}^-(x) = I_0^b e^{-jk_1 x} + I_1^b e^{2\gamma L} e^{-\gamma x} + (R_3^- I_1^b e^{-2\gamma L} + S_3^- I_0^b e^{-2jk_1 L - 2\gamma L}) e^{\gamma x} \quad (24)$$

式中: $I_{3\text{-asy}}^-(x)$ 为左半无限长传输线渐近区总电流; I_1^b 为从左往右流向垂直端 3 的假设电流; S_3^- 为垂直端 3 处的散射系数。

考虑中间垂直端,同时左右无限长直线时:

$$I_{2\text{-asy}}^-(x) = I_0^a e^{-jk_1 x} + I_3^a e^{\gamma L} e^{-\gamma x} + (S_2^- I_0^a e^{-jk_1 L - \gamma L} + P_2^- I_4^a e^{-\gamma L} + R_2^- I_3^a e^{-\gamma L}) e^{\gamma x} \quad (25)$$

$$I_{2\text{-asy}}^+(x) = I_0^b e^{-jk_1 x} + I_4^b e^{-\gamma L} e^{\gamma x} + (S_2^+ I_0^b e^{-jk_1 L + \gamma L} + P_2^+ I_3^b e^{\gamma L} + R_2^+ I_4^b e^{\gamma L}) e^{-\gamma x} \quad (26)$$

式中: $I_{2\text{-asy}}^-(x)$ 为左右无限长直线时垂直端 2 左侧总电流; $I_{2\text{-asy}}^+(x)$ 为左右无限长直线时垂直端 2 右侧总电流; I_3^a 、 I_4^a 分别为从左侧流向垂直端 2 和从右侧流向垂直端 2 的假设电流; S_2^- 、 S_2^+ 为垂直端 2 处的散射系数。

通过对应渐近区电流相等,得到以下等式:

$$\begin{cases} I_{1\text{-asy}}^+ = I_{2\text{-asy}}^- \\ I_{2\text{-asy}}^+ = I_{3\text{-asy}}^- \end{cases} \quad (27)$$

为求解该方程,令对应项的系数相等,可以解出由反射系数,透射系数以及散射系数表示的 4 个假设电流,再根据假设电流与渐近区前行波,反行波系数对应项关系,求得由反射系数,透射系数以及散射系数构成的渐近区电流响应。

$$\begin{cases} I_1^a = I_3^a e^{\gamma L} \\ I_2^a = I_2^a \\ I_1^b = I_1^b e^{2\gamma L} \\ I_2^b = I_4^b e^{-\gamma L} \end{cases} \quad (28)$$

散射系数、反射系数和透射系数与线路长度的关系可以通过式(1)~式(4)求出,采用相同的方法,在全波数值求解器(NEC-4)中设置长度为 $2L_A$ ($2L_A = 6L_b$)、几何形状相同的 3 条辅助线,一条在线路的左端有电压激励源 U ,一条在线路的右端有

电压激励源 U ,最后一条使用相同的平面波激励,具体见图 5。

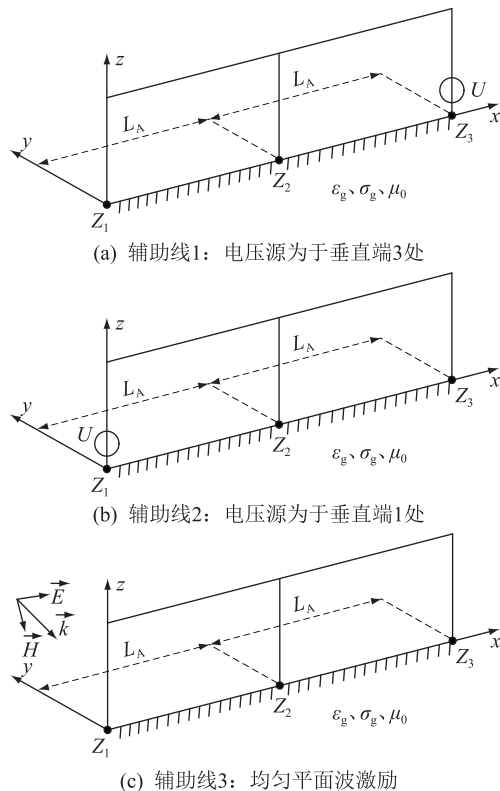


图 5 构建辅助线求解系数

Fig.5 Auxiliary lines to solve the coefficients

如图 5 所示,辅助线 1 将电压激励源设置在垂直端 3 处,垂直端 1 的反射系数、垂直端 2 的反射系数和透射系数与垂直端 3 的电压源无关。同样,辅助线 2 将电压激励源设置在垂直端 1 处,可以得到垂直端 3 的反射系数、垂直端 2 的反射系数和透射系数。从前 2 条辅助线得到各垂直端的反射系数和透射系数后,根据辅助线 3,考虑平面波激励时,计算各垂直端的散射系数。定义辅助线的离散空间步长为 Δx ,此时辅助线沿渐近区域的电流可表示为:

$$\begin{cases} I(n_1 \Delta x) = I_0^Z e^{-jk_1 n_1 \Delta x} + I_1^Z e^{-\gamma n_1 \Delta x} + I_2^Z e^{\gamma n_1 \Delta x} \\ I(n_2 \Delta x) = I_0^Y e^{-jk_1 n_2 \Delta x} + I_1^Y e^{-\gamma n_2 \Delta x} + I_2^Y e^{\gamma n_2 \Delta x} \end{cases} \quad (29)$$

其中:

$$\begin{cases} n_1 = N + 1, N + 2, \dots, M - N \\ n_2 = M + N + 1, M + N + 2, \dots, 2M - N \\ M = L_A / \Delta x \\ N = L_b / \Delta x \end{cases} \quad (30)$$

电流系数 I_0^Z 、 I_1^Z 、 I_2^Z 、 I_0^Y 、 I_1^Y 、 I_2^Y 可以通过最小二乘法^[21]拟合 NEC-4 中的数据得到,上标“Z”表示第一级传输线的电流系数,上标“Y”表示第二级传输

线的电流系数,并且由于线路长度较短,计算效率显著提高。设辅助线 1 电流为 $I_{A1}(x)$, 辅助线 2 电流为 $I_{A2}(x)$, 辅助线 3 电流为 $I_{Apw}(x)$, 拟合得到辅助线渐近区前行波与反行波电流表达式为:

$$I_{A1}(x) = \begin{cases} I_1^{Z-} e^{-\gamma x} + I_2^{Z-} e^{\gamma x} \\ I_1^{Y-} e^{-\gamma x} + I_2^{Y-} e^{\gamma x} \end{cases} \quad (31)$$

$$I_{A2}(x) = \begin{cases} I_1^{Z+} e^{-\gamma x} + I_2^{Z+} e^{\gamma x} \\ I_1^{Y+} e^{-\gamma x} + I_2^{Y+} e^{\gamma x} \end{cases} \quad (32)$$

$$I_{Apw}(x) = \begin{cases} I_1^{Zpw} e^{-\gamma x} + I_2^{Zpw} e^{\gamma x} \\ I_1^{Ypw} e^{-\gamma x} + I_2^{Ypw} e^{\gamma x} \end{cases} \quad (33)$$

式中:上标“-”表示辅助线 1 的电流系数,上标“+”表示辅助线 2 的电流系数,上标“pw”表示辅助线 3 的电流系数。通过辅助线 1 和辅助线 2 求解反射系数和透射系数。辅助线 1 垂直端 1 处和辅助线 3 垂直端 3 处的反射系数如下:

$$\begin{cases} R_1^+ = I_1^{Z-} / I_2^{Z-} \\ R_3^- = I_2^{Y+} e^{4\gamma L_A} / I_1^{Y+} \end{cases} \quad (34)$$

对于垂直端 2, 将其视为散射体, 通过辅助线 1 和辅助线 2 可以列出如下方程:

$$\begin{cases} I_2^{Z+} e^{\gamma L_A} = P_2^- I_2^{Y+} e^{\gamma L_A} + R_2^- I_1^{Z+} e^{-\gamma L_A} \\ I_2^{Z-} e^{\gamma L_A} = P_2^- I_2^{Y-} e^{\gamma L_A} + R_2^- I_1^{Z-} e^{-\gamma L_A} \\ I_1^{Y+} e^{-\gamma L_A} = P_2^+ I_1^{Z+} e^{-\gamma L_A} + R_2^+ I_2^{Y+} e^{\gamma L_A} \\ I_1^{Y-} e^{-\gamma L_A} = P_2^+ I_1^{Z-} e^{-\gamma L_A} + R_2^+ I_2^{Y-} e^{\gamma L_A} \end{cases} \quad (35)$$

求解上述方程, 得到垂直端 2 处透射系数和反射系数的值。须注意的是, 只得到辅助线垂直端 2 处的反射系数和透射系数。由于散射体的反射系数和透射系数都与长度有关, 因此当这些系数应用于实际的长线时, 还要根据式(1)一式(4)来改变。最后根据得到的反射系数和透射系数, 以及辅助线 3 的电流表达式, 可以得到各个垂直端处的散射系数。

$$\begin{cases} S_1^+ I_0 = I_1^{Zpw} - R_1^+ I_2^{Zpw} \\ S_2^- I_0 = (I_2^{Zpw} - P_2^- I_2^{Ypw} - R_2^- I_1^{Zpw} e^{-2\gamma L_A}) e^{\gamma L_A} e^{jk_1 L_A} \\ S_2^+ I_0 = (I_1^{Ypw} - P_2^+ I_1^{Zpw} - R_2^+ I_2^{Ypw} e^{2\gamma L_A}) e^{-\gamma L_A} e^{jk_1 L_A} \\ S_3^- I_0 = (I_2^{Ypw} - R_3^- I_1^{Ypw} e^{-4\gamma L_A}) e^{2\gamma L_A} e^{2jk_1 L_A} \end{cases} \quad (36)$$

根据辅助线也可以得到 4 个终端区域的未知函数解。根据文献[20], 求得渐近区电流表达式以后, 可以通过分步求解的方法得到对应终端区域的电流解。

综上所述, 所有沿线的电流都可以用渐近法计算, 同时可以将这种带有散射体的多级电力系统渐近法推广应用到多导体的情况中^[24-26]。

3 算例分析

首先, 建立一条带有 3 个垂直端的电力系统传输线, 此时散射体的位置并不在线路的中间处, 把渐近法得到的结果与全波数值算法(NEC-4)的结果进行比较, 从而验证渐近法的正确性。

如图 6 所示, 多级传输线由 3 个垂直端组成, 传输线直径为 1 mm, 输电线路总长度为 500 m, L_{12} 为 100 m, L_{23} 为 400 m, 垂直端的高度为 10 m。假设每个垂直端处的终端负载为 50 Ω 。地面电导率 $\sigma_g = 0.01$ S/m, 相对介电常数 $\epsilon_g = 10$, 均匀平面波振幅为 1 V/m, 频率为 100 MHz。偏振角为 0°, 方位角为 0°, 仰角为 45°。采用线路结构相同, 但是总长度为 120 m 的辅助线求解反射系数, 透射系数和散射系数。在求出未知系数 $I_0^a, I_1^a, I_2^a, I_0^b, I_1^b, I_2^b$ 后, 可根据式(20)、式(21)得到渐近区电流的表达式, 进而求出终端电流。

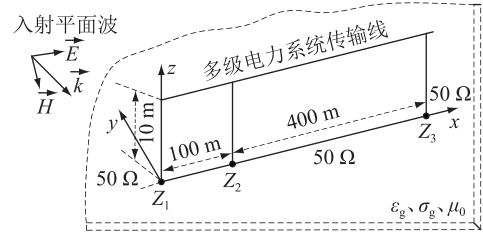


图 6 实际算例

Fig.6 Actual study

由于辅助线的长度极大缩短, 全波数值算法的求解速度进一步提高, 采用全波数值算法消耗的时间为 116.4 s, 而采用渐近法的求解时间为 8.13 s。因此采用渐近法能极大地提高求解效率。

利用渐近法求得的电流和用全波数值算法(NEC-4)求得的电流解的对比如图 7—图 12 所示。可以看到, 渐近法得到的结果与全波数值算法得到的结果具有高度的相似性。

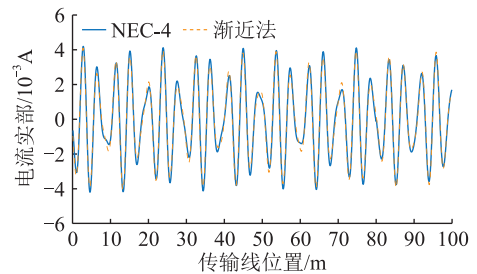


图 7 渐近法与 NEC-4 计算垂直端 1 与 2 之间 0~100 m 处电流的实部结果对比

Fig.7 Comparison of the real results of calculating the current at 0~100 m between vertical end 1 and end 2 by the asymptotic method and NEC-4

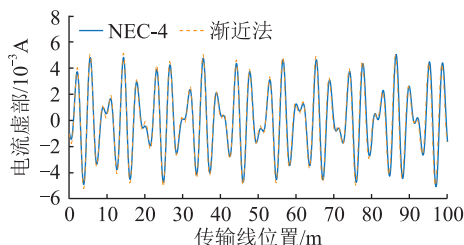


图8 渐近法与 NEC-4 计算垂直端 1 与 2 之间 0~100 m 处电流的虚部结果对比

Fig.8 Comparison of the imaginary real results of calculating the current at 0~100 m between vertical end 1 and end 2 by the asymptotic method and NEC-4

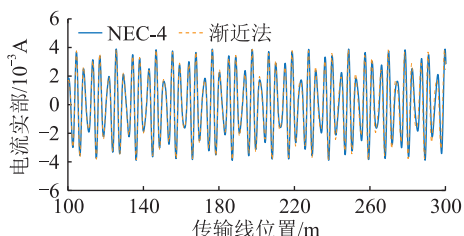


图9 渐近法与 NEC-4 计算垂直端 2 与 3 之间 100~300 m 处电流的实部结果对比

Fig.9 Comparison of the real results of calculating the current at 100~300 m between vertical end 2 and end 3 by the asymptotic method and NEC-4

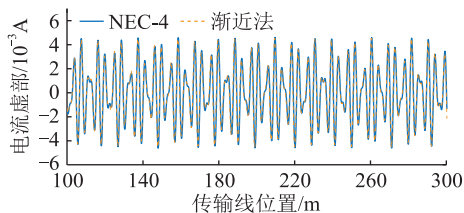


图10 渐近法与 NEC-4 计算垂直端 2 与 3 之间 100~300m 处电流的虚部结果对比

Fig.10 Comparison of the imaginary results of calculating the current at 100~300 m between vertical end 2 and end 3 by the asymptotic method and NEC-4

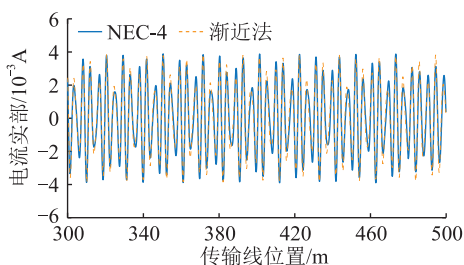


图11 渐近法与 NEC-4 计算垂直端 2 与 3 之间 300~500 m 处电流的实部结果对比

Fig.11 Comparison of the real results of calculating the current at 300~500 m between vertical end 2 and end 3 by the asymptotic method and NEC-4

可以采用相对均方根误差来分析 2 组数据的误差,相对均方根误差计算公式如下:

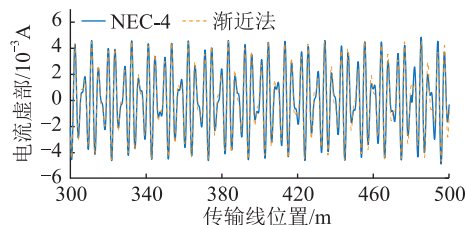


图12 渐近法与 NEC-4 计算垂直端 2 与 3 之间 300~500 m 处电流的虚部结果对比

Fig.12 Comparison of the imaginary results of calculating the current at 300~500 m between vertical end 2 and end 3 by the asymptotic method and NEC-4

$$\varepsilon_r = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^K (|I_n(i)| - |I_a(i)|)^2 / K}}{\sum_{i=1}^K |I_n(i)| / K} \quad (37)$$

式中: K 为全波数值算法软件中分段总数; $I_n(i)$ 为 NEC-4 计算得到的电流; $I_a(i)$ 为渐近法计算得到的电流。计算得到 0~100 m 段误差为 3.84%, 100~500 m 段误差为 4.98%。

4 结论

文中研究了在有损耗地面上方受到平面波激励的电力系统多级传输线的渐近法高频耦合模型。得到以下结论:

(1) 在高频平面波的激励下,入射波的波长比传输线的高度小,经典传输线理论会失效。文中采用半解析的形式,给出电力系统多级传输线上的电流解,使用全波数值算法计算较短辅助线的散射系数、透射系数和反射系数,然后利用这些系数进行分析得到整条线路的电流,从而提高计算效率。

(2) 文中以渐近法为基础,结合散射体的特性,导出含散射体的电力系统多级传输线的电流表达式,并与全波数值算法的结果进行了比较。算例表明,渐近法能较好地获得沿输电线路的电流,在极大缩短计算时间的同时保持高精度。

在未来,渐近法将适用于多导体多垂直端传输线、无限长多垂直端传输线和传输线网络的情景。

致 谢

本文得到强脉冲辐射场模拟与效应国家重点实验室项目 (SKLIPR1909) 资助,谨此致谢!

参考文献:

[1] 赵晋飞,张壮壮,刘琛硕,等. 扫频电流下不同电流频率对 GIS 电磁分布特性的影响[J]. 电力工程技术,2020,39(6): 138-142.
ZHAO Jinfei, ZHANG Zhuangzhuang, LIU Chenshuo, et al. E-lectromagnetic distribution characteristics of GIS under sweeping

- current[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2020, 39(6):138-142.
- [2] 刘政,黑东炜,毛从光,等. 架空线缆高空电磁脉冲传导环境参数的计算与分析[J]. *现代应用物理*, 2021, 12(2):64-70.
LIU Zheng, HEI Dongwei, MAO Congguang, et al. Calculation and analysis of conducted parameters of elevated lines under high-altitude electromagnetic pulse[J]. *Modern Applied Physics*, 2021, 12(2):64-70.
- [3] 秦锋,陈伟,王旭桐,等. 强电磁脉冲下金属氧化物避雷器瞬态响应特性[J]. *高电压技术*, 2022, 48(8):3326-3333.
QIN Feng, CHEN Wei, WANG Xutong, et al. Transient response characteristics of metal oxide arrester under strong electromagnetic pulse[J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(8):3326-3333.
- [4] 董宁,孙颖力,王宗扬,等. 基于 QMU 的高空电磁脉冲下电气电子设备易损性评估方法[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33(12):84-89.
DONG Ning, SUN Yingli, WANG Zongyang, et al. Threat assessment method based on quantification of margins and uncertainties for electrical electronic equipment under high-altitude electromagnetic pulse [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33(12):84-89.
- [5] 杜传报,毛从光,崔志同,等. 分层视角下无线通信网络高空电磁脉冲效应[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33(10):55-63.
DU Chuanbao, MAO Congguang, CUI Zhitong, et al. Analysis of high-altitude electromagnetic pulse effect on wireless communication network from hierarchical perspective [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33(10):55-63.
- [6] 张汉花,邹军,田蓓,等. 高空核爆电磁脉冲激励下架空输电线路绝缘子闪络情况分析[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(2):435-443.
ZHANG Hanhua, ZOU Jun, TIAN Bei, et al. Flashover possibility analysis of overhead power transmission and distribution line insulators with the excitation of high altitude electromagnetic pulse[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(2):435-443.
- [7] 高晓东,安韵竹,毕斌,等. 输电线路雷击接地散流与附近管道过电压防护研究[J]. *电力工程技术*, 2021, 40(1):162-166, 174.
GAO Xiaodong, AN Yunzhu, BI Bin, et al. Lightning grounding dispersion of transmission lines and overvoltage protection of nearby pipelines [J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2021, 40(1):162-166, 174.
- [8] 文屹,陈易飞,毛先胤,等. 500 kV 输电铁塔覆冰风险评估与加固措施[J]. *电力工程技术*, 2023, 42(2):250-257.
WEN Yi, CHEN Yifei, MAO Xianyin, et al. Icing risk assessment and reinforcement measures of 500 kV transmission tower [J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2023, 42(2):250-257.
- [9] 马勇,夏拥军,张恒武,等. 输电线路悬索式跨越架抗冲击性能影响规律研究[J]. *电力工程技术*, 2021, 40(4):75-82.
MA Yong, XIA Yongjun, ZHANG Hengwu, et al. Impact behavior influence rules of suspension spanning frame in transmission line[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2021, 40(4):75-82.
- [10] 宰红斌,刘云峰,卫栋,等. 面向采空区的输电线路杆塔设计优化方法[J]. *电力工程技术*, 2021, 40(4):182-188.
ZAI Hongbin, LIU Yunfeng, WEI Dong, et al. Optimization method of transmission line tower design for goaf [J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2021, 40(4):182-188.
- [11] 陈思危,李保宏,刘天琪,等. 考虑电缆和架空线参数频变特性的直流电网阻抗建模[J]. *电力工程技术*, 2022, 41(6):101-108.
CHEN Siwei, LI Baohong, LIU Tianqi, et al. Impedance modeling of DC grid considering the frequency-dependent characteristics of cable and overhead line parameters [J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2022, 41(6):101-108.
- [12] 吴琛,苏明昕,谢云云,等. 基于 BP 神经网络的输电线路雷击故障预测[J]. *电力工程技术*, 2020, 39(5):133-139.
WU Chen, SU Mingxin, XIE Yunyun, et al. BP neutral network based lightning fault prediction of transmission lines [J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2020, 39(5):133-139.
- [13] 廖成,张胤,尚玉平,等. 传输线电磁脉冲耦合问题研究综述[J]. *微波学报*, 2020, 36(1):103-110.
LIAO Cheng, ZHANG Yin, SHANG Yuping, et al. Review on the study of EMP-to-transmission line coupling problem [J]. *Journal of Microwaves*, 2020, 36(1):103-110.
- [14] 叶志红,张杰,周健健,等. 有耗介质层上多导体传输线的电磁耦合时域分析方法[J]. *物理学报*, 2020, 69(6):47-54.
YE Zhihong, ZHANG Jie, ZHOU Jianjian, et al. Time domain hybrid method for coupling analysis of multi-conductor transmission lines on the lossy dielectric layer excited by ambient wave [J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(6):47-54.
- [15] 彭磊,程养春,郑丹阳,等. 可外接分布参数元件的变压器绕组多导体传输线暂态模型及其模块化封装[J]. *高电压技术*, 2022, 48(10):3955-3965.
PENG Lei, CHENG Yangchun, ZHENG Danyang, et al. Attachable transient model and its modular packaging of transformer winding multi-conductor transmission lines with external distributed parameter components [J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(10):3955-3965.
- [16] 宋远见,徐政,余敬秋,等. 海上风机塔筒的非均匀传输线模型[J]. *中国电力*, 2020, 53(7):92-99, 216.
SONG Yuanjian, XU Zheng, YU Jingqiu, et al. Non-uniform transmission line model of offshore wind turbine tower [J]. *Electric Power*, 2020, 53(7):92-99, 216.
- [17] MIDDELSTAEDT F, TKACHENKO S V, VICK R. The induced EMF method as an alternative to the iterative method for the approximation of the reflection coefficient on thin wires [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(8):4781-4788.
- [18] 杜子韦华,张晓琴,朱洪斌,等. 高频电磁干扰对传输线耦合全波建模方法[J]. *强激光与粒子束*, 2023, 35(2):70-76.
DU Ziweihua, ZHANG Xiaoqin, ZHU Hongbin, et al. Full-wave

- modeling method for high-frequency electromagnetic disturbances coupling to transmission lines[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2023, 35(2): 70-76.
- [19] 彭楠,程真何,崔玉,等. 半波长输电线路行波传播特性及故障测距[J]. 电力工程技术, 2020, 39(1): 86-94.
PENG Nan, CHENG Zhenhe, CUI Yu, et al. Travelling wave propagation characteristics and fault location of half-wave length transmission lines[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(1): 86-94.
- [20] GUO J, RACHIDI F, TKACHENKO S V, et al. Calculation of high-frequency electromagnetic field coupling to overhead transmission line above a lossy ground and terminated with a nonlinear load[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(6): 4119-4132.
- [21] 原康康,卫志农,段方维,等. 基于多新息最小二乘算法的电力线路参数辨识[J]. 电力工程技术, 2020, 39(4): 55-60.
YUAN Kangkang, WEI Zhinong, DUAN Fangwei, et al. Power line parameter identification based on multi-innovation least square algorithm[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(4): 55-60.
- [22] GUO J, XIE W C, XIE Y Z, et al. An efficient model of high-frequency electromagnetic field coupling to multiconductor transmission lines with the presence of the lossy ground[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2022, 64(6): 2261-2272.
- [23] NITSCH J B, RAMBOUSKY R, TKACHENKO S. Introduction of reflection and transmission coefficients for nonuniform radiating transmission lines[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2015, 57(6): 1705-1713.
- [24] 张胤,郑琰锦,高子惠,等. 不等长多导体传输线模型串扰问题分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2023, 21(2): 203-207.
ZHANG Yin, ZHENG Yanjin, GAO Zihui, et al. Analysis of crosstalk problem in multiconductor transmission lines model with unequal length[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2023, 21(2): 203-207.
- [25] 李祥超,欧阳文,文巧莉. 多导体传输线耦合雷电波的特性分析[J]. 电瓷避雷器, 2022(6): 15-24.
LI Xiangchao, OUYANG Wen, WEN Qiaoli. Characteristic analysis of coupled lightning waves in multi-conductor transmission lines[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(6): 15-24.
- [26] 于全毅,刘长英,吴定超,等. 基于广义混沌多项式法的多导体传输线辐射敏感度分析方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(17): 3591-3600.
YU Quanyi, LIU Changying, WU Dingchao, et al. Radiation sensitivity analysis of multiconductor transmission lines based on generalized polynomial chaos method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(17): 3591-3600.

作者简介:



郑群爽

郑群爽(1999),男,硕士在读,研究方向为电力系统多级传输线高频耦合模型(E-mail: 1805795426@qq.com);

郭俊(1986),男,博士,副教授,研究方向为多导体传输线的电磁瞬态分析与电磁瞬变测量;

谢玮琛(1998),男,硕士,研究方向为高频电磁场与多导体传输线耦合。

High frequency coupling model of multi-level transmission lines in power systems with scatterers

ZHENG Qunshuang, GUO Jun, XIE Weichen, XIE Yanzhao

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: High-frequency electromagnetic fields can couple to overhead transmission lines. When the wavelength of the high-frequency electromagnetic fields is smaller than the height of the transmission lines, the classical transmission line theory is no longer applicable. Although the traditional full-wave numerical algorithm can solve this problem, the solution is very inefficient, and it needs to consume a lot of time and computational resources. In addition, power system transmission lines often have multiple vertical ends, and the line layout is complex, while previous studies on efficient solutions for power system transmission lines are simple models with only two vertical ends on the left and right, which can not be conformed to the structure of the actual power system transmission lines. In order to solve these problems, a theoretically effective method is proposed in this paper to address the high-frequency electromagnetic fields coupling to multilevel transmission lines of power systems with scatterers. The computationally efficient asymptotic method is used, and the concept of scatterers is introduced into the asymptotic method. Finally, the accuracy and effectiveness of the method are verified by numerical examples.

Keywords: multilevel transmission lines in the power system; asymptotic method; high frequency electromagnetic field; full wave numerical algorithm; scatterer; loss ground

(编辑 方晶)