

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.04.009

电力系统架空多导体传输线的高频耦合电流计算模型

谢玮琛, 郭俊, 郑群爽, 谢彦召

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

摘要: 架空传输线作为电力系统中的重要组成部分,其在瞬态电磁场或激励源作用下(例如高空电磁脉冲)通常能够耦合出高幅值过电流,将作为强电磁干扰的耦合路径对电力系统造成严重干扰。现有建模方法中,经典传输线理论在处理非电小尺寸横截面线路的高频耦合问题时存在较大误差;全波数值算法(例如矩量法)依赖网格剖分计算过程使得其在处理长线情况时效率不高。此外,电力系统中往往线缆数量较多,且地面均须考虑实际有耗情况。为解决上述问题,文中提出一种能够计算电力系统架空传输线高频耦合电流的渐近模型。基于计算效率较高的渐近理论,引入反射与散射过程对高阶模式分量进行量化,并针对任意线路数量、任意参数地面及不同激励情况,推导统一电流表达式。最后,利用全波数值仿真以及天线辐照实验验证模型有效性和可靠性。结果表明,文中计算模型能够快速计算高频耦合电流,为线路防护以及电磁效应研究提供理论基础与数据支撑。

关键词: 架空传输线;有损耗地面;渐近法;高频耦合电流;全波数值算法;天线辐照实验

中图分类号: TM75; TN811

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2024)04-0088-07

0 引言

强电磁干扰通常能够作为极具威胁的干扰信号,通过架空线路处耦合的过电流,对电力系统造成破坏,影响电力系统的安全稳定运行。以高空电磁脉冲为例,其作用范围广、频谱范围宽的特点使其成为目前研究热点。其耦合产生的过电流有可能超过电流系统或设备的绝缘等级,从而诱发浪涌或闪络等绝缘问题^[1-6]。架空线路作为电力系统中重要组成部分^[7-12],横截面尺寸可能远超强电磁干扰最小波长,此类高频耦合问题将给电流预测带来困难。因此,需要提出相应高频耦合电流计算模型,为后续电力系统防护与电磁效应研究提供理论基础与数据支撑。

国内外学者已经针对基于经典传输线理论的低频耦合模型开展了大量研究^[13]。随着对高频耦合问题重视程度的不断提高,经典传输线已无法满足相关计算的精度需求。考虑到全波数值算法的效率问题,国内外学者从传输线方程入手,提出了一系列能够充分考虑高阶模式分量的高频耦合模型^[14]。文献[15]提出一种递归修正迭代的高频耦合模型,可以应用于多导体架空线路的计算中。文献[16]提出一种计算单架空线路高频反射过程的数值求解方法,通过感应电动势进行解析逼近,然而其仅适用于理想地面的情况。文献[17]通过提取宏模型参数,并利用模拟行为建模实现对频变参数的快速时域变换,得到一种能够高效处理高频电

磁脉冲耦合下线缆电流的时域方法,然而其宏模型参数求解依赖于全波算法,在较长线缆下的计算效率较低。

上述高频耦合模型大多涉及迭代与数值积分形式的计算流程,效率提升有限。因此,针对长线高频耦合问题,近年来国内外学者提出了能够半解析计算高频耦合电流的渐近模型。文献[18]对高阶模式分量的分布规律进行了总结,利用电流辐射模式与线路位置坐标的映射,提出能够计算理想地面上方单线系统的高频耦合电流。文献[19]考虑实际地面情况,将地面损耗引入渐近法中,并完成了仿真可靠性验证。文献[20]引入矩阵思想,实现对理想地面上方任意数量线路的高频耦合电流计算,然而其在线缆数量增多时效率下降较快,未能考虑实际地面情况,且仅能计算均匀外场激励,故应用场景较为局限。

针对上述渐近模型在不同情况下计算流程与步骤不统一的缺陷,文中旨在进一步研究渐近方法,提出能够进一步处理任意数量线缆、不同激励情况以及任意参数地面的渐近模型。文中首先阐述渐近理论对于传输线的区域划分,针对不同的激励情况,利用反射系数与散射系数推导传输线电流的统一半解析表达式。然后,针对文献[20]求解反射与散射系数的缺陷进行相应改进,进一步提升其计算效率。最后,通过仿真数值算例与天线辐照实验对文中所提渐近模型进行可靠性验证。

1 电力系统架空多导体线路区域划分

文中考虑的电力系统架空传输线及地面结构

收稿日期:2024-02-11;修回日期:2024-04-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52207015)

如图1所示。假设地面上方存在 N 根水平长度均为 L 的理想架空多导体线路,对于第 i 根导线 ($i=1, 2, \dots, N$), 其高度为 h_i , 且多导体传输线的最大高度 h_{\max} 远小于线路水平长度 L 。线路两端均作接地处理,垂直部分导线末端通过尺寸远小于线路高度的集总负载 Z_{i1}, Z_{i2} 进行连接。地面考虑为有耗导电平面,其电导率为 σ_g , 相对介电常数为 ϵ_g , 磁导率考虑为真空磁导率 μ_0 。

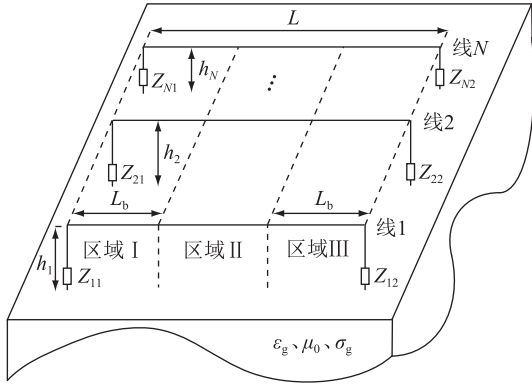


图1 电力系统架空传输线结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of overhead transmission line structure in the power system

基于渐近理论将架空多导体线路根据其高频分量的分布特性进行相应区域划分。总共分为3个区域,区域I和区域III的长度均为 L_b , 其选择为线路最大高度的2倍^[19-20]。其中,区域I、区域III作为靠近左负载与右负载的区域,其高频分量(例如辐射模式与泄露模式)较为集中,需要采用数值方法进行表达。而对于区域II,基于渐近理论,其沿线高频分量可以忽略,该区域通常视为无限长多导体传输线,其沿线电流通过经典传输线的频域解析形式^[18-19]表达为:

$$I(x) = Te^{-\gamma x} I_1 + Te^{\gamma x} I_2 \quad L_b \leq x \leq L - L_b \quad (1)$$

式中: T 为模量变换矩阵; γ 为传播常数矩阵; I_1, I_2 分别为正、反向电流。其中指数矩阵可以表示为:

$$e^{\pm \gamma x} = \begin{bmatrix} e^{\pm \gamma_1 x} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & e^{\pm \gamma_2 x} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & e^{\pm \gamma_N x} \end{bmatrix} \quad (2)$$

传播常数矩阵 γ 与模量变换矩阵 T 的关系可以用单位阻抗 Z 与单位导纳 Y 表示为^[21]:

$$T^{-1} Y Z T = \gamma^2 = \begin{bmatrix} \gamma_1^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \gamma_2^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \gamma_N^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

2 架空多导体线路渐近法分析

为了快速求解上述电力系统架空线路的全线电流,需要利用一系列未知系数矩阵进行相关表示,以便得到进行半解析计算的电流表达式。

首先考虑端接集总激励的串扰耦合情况。渐近法利用半无限长架空多导体线路进行表达,对于左负载产生的散射与反射可以用电流行波与离散电流进行相应表示,如图2所示^[22]。

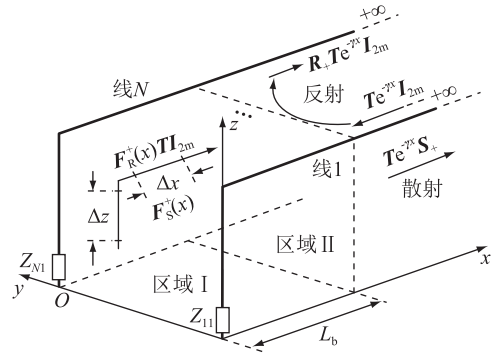


图2 电流流过左负载处产生的散射与反射过程示意

Fig.2 Schematic diagram of scattering and reflection process of electric current through the left load

假设此时集总电压源位于1号架空线路的垂直导线部分,则此时图2中右半无限长架空多导体线路的电流可以表示为如下半解析形式。

$$I_1(x) = \begin{cases} F_S^+(x) + F_R^+(x) T I_{2m} & 0 \leq x < L_b \\ T e^{\gamma x} I_{2m} + T e^{-\gamma x} (T^{-1} R_+ T I_{2m} + S_+) & L_b \leq x < +\infty \end{cases} \quad (4)$$

式中: $F_S^+(x), F_R^+(x)$ 分别为靠近左负载的由散射和反射引起的未知离散电流; I_{2m} 为从右方无穷远处流入的假想反向电流; R_+, S_+ 分别为靠近左负载的反射、散射矩阵。

同理,对于右负载处由反射与散射过程产生的电流可以通过左半无限长架空线路进行半解析求解,可以表示为:

$$I_1(x) = \begin{cases} T e^{-\gamma(x-L)} I_{1m} + T e^{\gamma(x-L)} (T^{-1} R_- T I_{1m} + S_-) & -\infty < x \leq L - L_b \\ F_S^-(x-L) + F_R^-(x-L) T I_{1m} & L - L_b < x \leq L \end{cases} \quad (5)$$

式中: I_{1m} 为从左方无穷远处流入右负载的假想正向电流; R_-, S_- 分别为靠近右负载的反射、散射矩阵; $F_S^-(x), F_R^-(x)$ 分别为靠近右负载的由散射和反射引起的未知离散电流。应当指出,在半解析表达右负

载引起的电流时,由于涉及线路终端的位置坐标并不为零,因此公式将包含长度信息 L 。

进一步地,由以上分析推导得到的电流在同一架空多导体线路中应当相等。因此利用待定系数法,最终得到架空多导体线路在端接集总激励下的电流为:

$$\mathbf{I}(x) = \begin{cases} \mathbf{F}_S^+(x) + \mathbf{F}_R^+(x)\mathbf{T}\mathbf{I}_{2m} & 0 \leq x < L_b \\ \mathbf{T}e^{-\gamma x}\mathbf{I}_1 + \mathbf{T}e^{\gamma x}\mathbf{I}_2 & L_b \leq x \leq L - L_b \\ \mathbf{F}_S^-(x - L) + \mathbf{F}_R^-(x - L)\mathbf{T}e^{-\gamma L}\mathbf{I}_1 & L - L_b < x \leq L \end{cases} \quad (6)$$

其中,中间区域的电流可以利用散射与反射系数表示为:

$$\begin{cases} \mathbf{I}_1 = (\mathbf{E}_N - \mathbf{T}^{-1}\mathbf{R}_+ \mathbf{T}e^{-\gamma L}\mathbf{T}^{-1}\mathbf{R}_- \mathbf{T}e^{-\gamma L})^{-1} \cdot \\ \quad (\mathbf{S}_+ + \mathbf{T}^{-1}\mathbf{R}_+ \mathbf{T}e^{-\gamma L}\mathbf{S}_-) \\ \mathbf{I}_2 = (\mathbf{E}_N - e^{-\gamma L}\mathbf{T}^{-1}\mathbf{R}_- \mathbf{T}e^{-\gamma L}\mathbf{T}^{-1}\mathbf{R}_+ \mathbf{T})^{-1} \cdot \\ \quad (e^{-\gamma L}\mathbf{S}_- + e^{-\gamma L}\mathbf{T}^{-1}\mathbf{R}_- \mathbf{T}e^{-\gamma L}\mathbf{S}_+) \end{cases} \quad (7)$$

式中: \mathbf{E}_N 为 N 阶单位矩阵。散射、反射矩阵及一系列未知离散电流的未知参数仅与线路的终端结构和激励性质有关^[20],其在长度变化时保持不变。因此可以通过构造线路长度更短的架空多导体线路,求解电流未知参数,从而对上述较长线路的电流进行计算,提升计算效率。当不存在激励时,对应散射矩阵对应为零。需要注意的是,当线路负载发生变化时,线路的反射与散射矩阵需要重新进行计算,这可能会对非线性负载的时域计算产生影响。然而,利用诺顿等效电路和时间推进法^[19],该模型对于时域非线性问题的计算效率将得到较大提升,这会在后续工作中进行研究。

高空电磁脉冲通常以平面波形式出现,因此还应推导渐近法在平面波激励下的电流计算公式。平面波对线缆的耦合路径主要为施加于线路沿线的轴向电场分量,即垂直导线处的垂直分量与水平导线处的水平分量,两者可以表示为^[23]:

$$\begin{cases} E_x(x, y, z) = E_{x0}e^{-jk\cos(\theta)\cos(\varphi x)} = E_{x0}e^{-jk_1x} \\ E_z(x, y, z) = E_{z0}e^{-jk\cos(\theta)\cos(\varphi x)} = E_{z0}e^{-jk_1x} \end{cases} \quad (8)$$

式中: E_{x0} 、 E_{z0} 分别为电场的垂直分量幅值和水平分量幅值,其与平面波入射角以及地面性质有关^[19]; k 为自由空间波数; θ 为平面波仰角; φ 为平面波方位角。对于垂直场引起的电流,可以将其沿线电场等效为一系列离散电压源后,利用上述集总激励下的电流公式进行建模处理,垂直导线部分的等效电压源如图3所示。

等效电压源可以表示为:

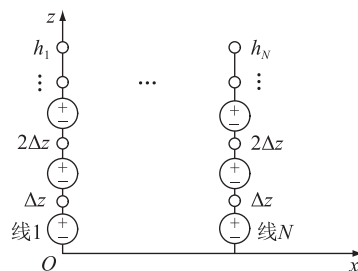


图3 垂直导线部分的等效电压源

Fig.3 Equivalent voltage sources of the vertical risers

$$V(x, y, z) = \int_z^{z+\Delta z} E_z(x, y, z) dz = E_z(x, y, z) \Delta z \quad (9)$$

而对于水平场引起的电流,由于中间区域可以等效为无限长架空线路进行处理,此时中间区域的渐近电流可以表示为与水平场相同复指数函数形式的强制电流及正向、反向电流的叠加^[20]。

$$\mathbf{I}(x) = \mathbf{I}_0 e^{-jk_1x} + \mathbf{T}e^{-\gamma x}\mathbf{I}_1 + \mathbf{T}e^{\gamma x}\mathbf{I}_2 \quad (10)$$

强制电流系数 \mathbf{I}_0 与长度无关。同理,利用上述半无限长线路的中间过程对水平场与垂直场进行推导,叠加可得两者共同作用的电流表达式为:

$$\mathbf{I}(x) = \begin{cases} \left(\sum_i \mathbf{F}_{Si}^+(x) + \mathbf{F}_H^+(x)\mathbf{I}_0 \right) + \mathbf{F}_R^+(x)\mathbf{T}\mathbf{I}_2 & 0 \leq x < L_b \\ \mathbf{I}_0 e^{-jk_1x} + \mathbf{T}e^{-\gamma x}\mathbf{I}_1 + \mathbf{T}e^{\gamma x}\mathbf{I}_2 & L_b \leq x \leq L - L_b \\ \sum_i \mathbf{F}_{Si}^-(x - L) e^{-jk_1L} + \mathbf{F}_H^-(x - L)\mathbf{I}_0 e^{-jk_1L} + \\ \mathbf{F}_R^-(x - L)\mathbf{T}e^{-\gamma L}\mathbf{I}_1 & L - L_b < x \leq L \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\mathbf{F}_{Si}^+(x)$ 、 $\mathbf{F}_{Si}^-(x)$ 分别为第 i 个等效电压源在左、右负载产生的散射电流; $\mathbf{F}_H^+(x)$ 、 $\mathbf{F}_H^-(x)$ 分别为水平电场在左、右负载产生的散射电流。正向与反向电流表示为:

$$\begin{cases} \mathbf{I}_1 = (\mathbf{E}_N - \mathbf{T}^{-1}\mathbf{R}_+ \mathbf{T}e^{-\gamma L}\mathbf{T}^{-1}\mathbf{R}_- \mathbf{T}e^{-\gamma L})^{-1} \cdot \\ \quad \left[\left(\sum_i \mathbf{S}_{i+} + \mathbf{H}_+ \mathbf{I}_0 \right) + \mathbf{T}^{-1}\mathbf{R}_+ \mathbf{T}e^{-\gamma L} \cdot \right. \\ \quad \left. \left(\sum_i \mathbf{S}_{i-} + \mathbf{H}_- \mathbf{I}_0 \right) e^{-jk_1L} \right] \\ \mathbf{I}_2 = (\mathbf{E}_N - e^{-\gamma L}\mathbf{T}^{-1}\mathbf{R}_- \mathbf{T}e^{-\gamma L}\mathbf{T}^{-1}\mathbf{R}_+ \mathbf{T})^{-1} \cdot \\ \quad \left[e^{-\gamma L} \left(\sum_i \mathbf{S}_{i-} + \mathbf{H}_- \mathbf{I}_0 \right) e^{-jk_1L} + \right. \\ \quad \left. e^{-\gamma L}\mathbf{T}^{-1}\mathbf{R}_- \mathbf{T}e^{-\gamma L} \left(\sum_i \mathbf{S}_{i+} + \mathbf{H}_+ \mathbf{I}_0 \right) \right] \end{cases} \quad (12)$$

式中: S_{i+} 、 S_{i-} 分别为第*i*个等效电压源在左、右负载处的散射矩阵; H_+ 、 H_- 分别为水平电场在左、右负载处的散射矩阵。应当指出,由于左右负载处电场的复指数关系,为了进一步方便求解右负载产生的散射,引入 e^{-jk_1L} 指数形式进行简化。

式(11)与式(12)即为文中计算模型的电流表达式,其能够计算任意数量线路、不同激励形式以及任意性质地面下的高频耦合电流。当线路为单导线时,矩阵退化为常数形式;当激励为端接集总电压源时,将式中 k_1 与强制电流系数 I_0 置零;而考虑理想地面情况时,矩阵 T 退化为单位矩阵,且传播常数退化为自由空间波数。

3 基于渐进法的架空多导体线路未知参数计算

上述散射、反射矩阵以及一系列未知离散电流均与长度无关,因此在长度较短的架空短线对上述参数进行反解,提高计算效率。根据未知参数个数,在矩量法中设置 $N+1$ 号除长度外其余参数配置均与原始线路相同的架空短线,并求解其全波电流。由于架空短线均可通过上述电流进行相应计算,可以利用最小二乘对中间区域的表达式进行解析拟合。

$$\begin{aligned} T^{-1}I_a(n\Delta x) &= T^{-1}I_0e^{-jk_1n\Delta x} + e^{-\gamma n\Delta x}I_1^a + e^{-\gamma n\Delta x}I_2^a \\ n &= \frac{L_b}{\Delta x} + 1, \frac{L_b}{\Delta x} + 2, \dots, \frac{L - L_b}{\Delta x} \end{aligned} \quad (13)$$

式中: I_a 为架空短线的全波电流; I_1^a 、 I_2^a 分别为拟合得到的正向电流和反向电流。在对多导体线路进行求解时,反解散射与反射矩阵均为非线性问题。为了提高求解速度,在待定系数推导时利用数学变换,将正向与反向电流以相互耦合的方程形式进行表示。

$$\begin{cases} I_{1m}^a = T^{-1}R_+ TI_{2m}^a + \left(\sum_i S_{i+} + H_+ I_0 \right) \\ I_{2m}^a = e^{-\gamma L_m} T^{-1}R_- T e^{-\gamma L_m} I_{1m}^a + e^{-\gamma L_m} \left(\sum_i S_{i-} + H_- I_0 \right) e^{-jk_1 L_m} \end{cases} \quad (14)$$

式中: I_{1m}^a 、 I_{2m}^a 分别为第*m*号架空短线的前向和反向电流行波系数矩阵, $m=1,2,\dots,N+1$; L_m 为第*m*号架空短线系统的长度, $L_m=3L_b+m\lambda/2$, λ 为波长。由于水平与垂直场的贡献可以等效为总体的散射矩阵,这里仅求解所有散射矩阵和的数值。负载区

域由于高频分量集中,因此需要对每个离散步长进行方程组反解,得到其未知离散电流为:

$$\begin{cases} I_{am}(n\Delta x) = \left(\sum_i F_{Si}^+(n\Delta x) + F_H^+(n\Delta x)I_0 \right) + \\ F_R^+(n\Delta x) TI_{2m}^a \quad n = 0, 1, \dots, \frac{L_b}{\Delta x} \\ I_{am}(n\Delta x) = \sum_i F_{Si}^-(n\Delta x - L_m) e^{-jk_1 L_m} + F_H^-(n\Delta x - \\ L_m) e^{-jk_1 L_m} + F_R^-(n\Delta x - L_m) T e^{-\gamma L_m} I_{1m}^a \\ n = \frac{L_m - L_b}{\Delta x}, \frac{L_m - L_b}{\Delta x} + 1, \dots, \frac{L_m}{\Delta x} \end{cases} \quad (15)$$

式中: I_{am} 为第*m*号架空短线的全波电流。

综上即为架空多导体线路渐进法的计算过程。尽管此时架空短线的数量有所增加,但其较少的网格剖分量避免了全波数值求解过程中时间成本的非线性消耗,仍具有较高的效率优势。

4 仿真分析与实验验证

在频域中建立架空多导体线路结构,对模型的可靠性进行验证。由于均匀平面波垂直场将包含对端接集总源的验证,将激励设置为平面波形式。双线系统结构如图4所示,有损耗地面上方的双线系统受到一斜 45° 入射,频率为50 MHz的单位均匀平面波激励。此时架空多导体线路的高度在该频率下为非电小尺寸,无法用经典传输线模型进行求解。

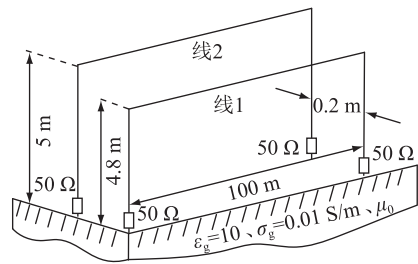


图4 双线系统结构

Fig.4 Structure of the two-wire system

利用文中所提模型与文献[20]所提模型分别对该高频耦合问题进行计算。其中,文中模型的架空短线数量设置为3,步长选择为0.1 m。架空短线长度分别设置为30 m、33 m和36 m,将2种模型计算结果与矩量法计算结果进行对比,1号线路的沿线电流实部与虚部结果分别如图5、图6所示。可以看出,文献[20]所提模型已无法满足有损耗地面情况下的电流评估,误差较大;而文中模型仍能实现该高频耦合情况下的电流精确计算。

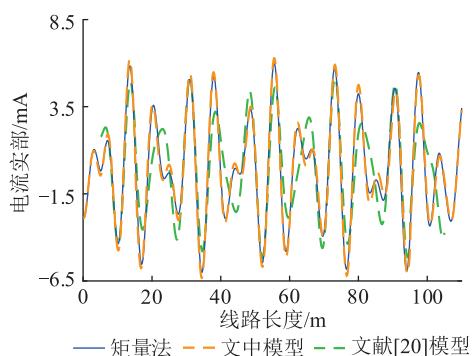


图5 1号线路沿线电流实部

Fig.5 Real part of current along the first wire

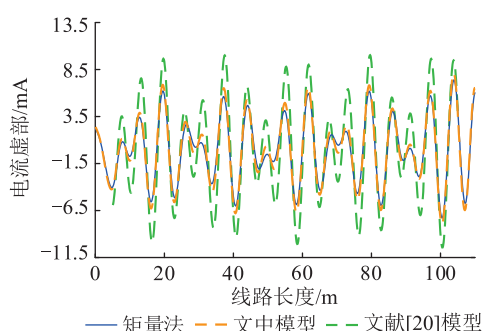


图6 1号线路沿线电流虚部

Fig.6 Imaginary part of current along the first wire

由于架空短线的长度极大缩短,全波数值算法的求解速度将进一步提高,不同计算方法耗时结果如表1所示。可见,采用文中模型能够极大地提高求解效率,且在时域计算中更为明显。

表1 不同计算方法耗时结果

Table 1 Time-consuming results of different calculation methods

算法	线路长度/m	耗时/s
全波数值算法	100	40.86
文中模型	100	8.54

利用文中模型计算图7所示三线系统在高空电磁脉冲作用下的电流响应。

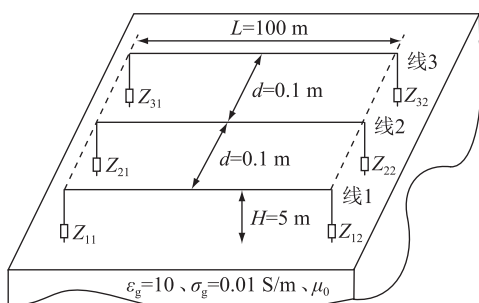


图7 三线系统结构

Fig.7 Structure of the three-wire system

其中高空电磁脉冲的波形选用 IEC 61000-2-9

标准中的规定波形,表达式为:

$$E(t) = 67.5(e^{-4 \times 10^7 t} - e^{-6 \times 10^8 t}) \quad (16)$$

利用逆傅里叶变换和文中模型对上述场景的沿线电流进行计算,所得负载 Z_{11} 处的电流响应如图8所示。由图8可知,文中模型与矩量法在峰值和前沿处吻合较好。在该情况下,高空电磁脉冲仍能耦合出数百安培的过电流,对线路产生威胁。

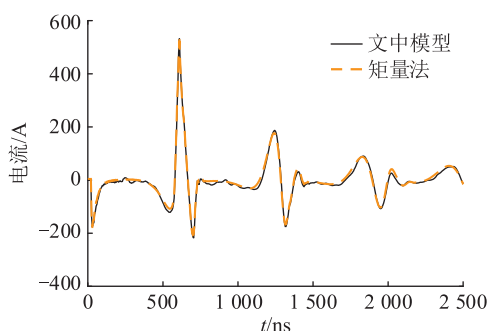


图8 负载 Z_{11} 处电流响应

Fig.8 Current response of Z_{11}

仍考虑图7所示的三线系统,对模型的计算精度进行分析。取线路长度 $L=200$ m,改变线路间距 d 和高度 H ,选取激励为斜 45° 入射、频率为 100 MHz 的单位均匀平面波,则其沿线电流幅值的平均相对误差如表2所示。由表2可知,当线路间距与高度变化时,文中所提模型平均相对误差均在 10% 以下,能够保持较好的精度与数值稳定性。

表2 不同线路参数时模型的平均相对误差

Table 2 Average relative error of the model with different line parameters

线路序号	线路高度/m	线路间距/m	平均相对误差/%
1	5	0.1	5.34
2	8	0.1	6.28
3	10	0.1	4.37
4	10	0.3	6.43
5	10	0.4	8.23
6	10	0.5	7.91

为了进一步验证文中模型,在电磁兼容暗室中搭建实验平台,于实际耦合中测试模型的有效性。天线辐照实验布置示意如图9所示,辐射天线选用 LN3142 型双锥对周复合天线,其频率可覆盖 30~1 000 MHz 的辐射敏感度测试要求,装配天线使其辐照方位处于线缆中部,主极化方向沿铜线方向,并垂直入射等效为理想地面的接地铝板。天线离线缆中部约 4 m,此时线缆范围内,天线处电场可近似等效为均匀平面波^[24]。

设置频率范围为 160~200 MHz,以满足高度非电小尺寸条件。将电场进行归一化后,实验结果、

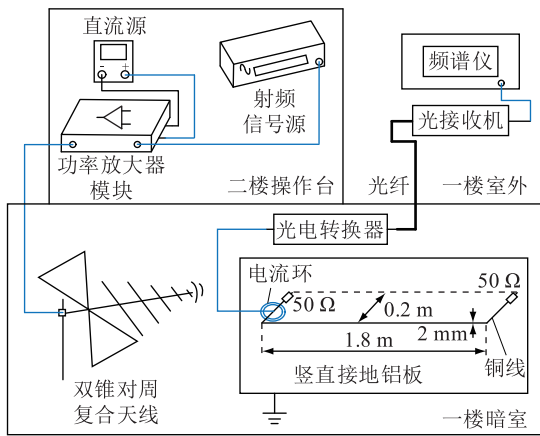


图9 天线辐照实验布置示意

Fig.9 Schematic diagram of antenna irradiation experiment layout

矩量法结果、文中模型以及经典传输线模型计算得到的归一化电流结果如图10所示。由图10可知,实验数据、矩量法及文中模型的电流在趋势上具有高度一致性,误差均小于 $4.2 \text{ dB} \cdot \mu\text{A}$,而经典传输线模型误差较大,已无法计算此场景下的电流。

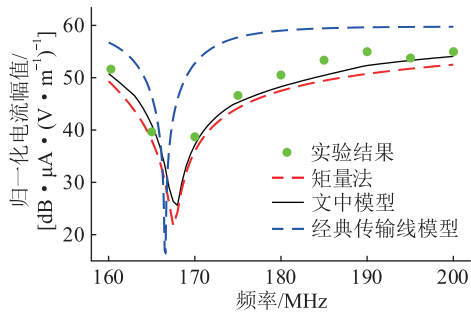


图10 铜线水平首段电流结果

Fig.10 Current results of the first horizontal segment of the copper wire

5 结语

文中研究了在有损耗地面上电力系统架空多导体线路的渐近法高频耦合计算模型。该场景下传统方法存在的精度与效率问题将对求解造成困难。基于渐近法,通过对架空多导体线路沿线电流进行半解析表征,并利用散射矩阵、反射矩阵以及一系列未知离散电流,实现对线路电流的快速计算。

在文中模型的基础上,从仿真和实验2个角度对模型的有效性进行了验证。通过比较仿真算例的频域与时域结果,发现文中模型能够获得精确的沿线电流结果且能够极大缩短计算时间。搭建天线辐照实验平台,比较实验数据与文中模型结果,验证了模型在实际应用中的可靠性。

在后续研究中,可将渐近法与时间推进法相结合,实现非线性负载的计算。此外,还能结合各类

电磁环境算法,形成不同的高频场线混合分析方法,进一步扩大渐近法在存在障碍物或非均匀激励等实际场景中的适用范围。

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] 李祥超,欧阳文,文巧莉,等. 同轴线耦合强电磁脉冲特性及其防护措施的研究[J]. 电瓷避雷器,2023(5):10-17.
LI Xiangchao, OUYANG Wen, WEN Qiaoli, et al. Characteristics of coaxial coupling nuclear electromagnetic pulse and its protective measures [J]. Insulators and Surge Arresters, 2023 (5):10-17.
- [2] 肖宏峰,罗日成,黄军,等. 基于多重雷击的超高压输电线路雷过电压分析[J]. 高压电器,2022,58(8):245-251.
XIAO Hongfeng, LUO Richeng, HUANG Jun, et al. Lightning over-voltage analysis of EHV transmission lines based on multiple lightning strikes [J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58 (8): 245-251.
- [3] 赵云龙,刘占双,李岩,等. 基于PCA-kmeans和图谱特征的绝缘子表面污秽程度评估方法[J]. 电瓷避雷器,2023(5):193-200.
ZHAO Yunlong, LIU Zhanshuang, LI Yan, et al. Evaluation of insulator surface pollution state based on PCA-kmeans and spectrum features [J]. Insulators and Surge Arresters, 2023 (5): 193-200.
- [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] 翟春雨,刘泰蔚,田晓云,等. 温度对套管环氧胶浸纸绝缘频域介电响应的研究[J]. 电瓷避雷器,2023(6):196-201,208.
ZHAI Chunyu, LIU Taiwei, TIAN Xiaoyun, et al. Effects of temperature environment on the dielectric properties of epoxy/paper composites for bushing [J]. Insulators and Surge Arresters, 2023 (6):196-201,208.
- [6] 何维晟,吴照国,徐扬,等. 高压电缆终端局部放电超声信号传输特性仿真分析[J]. 高压电器,2023,59(11):48-55,64.
HE Weisheng, WU Zhaoguo, XU Yang, et al. Simulation analysis of propagation characteristics of partial discharge ultrasonic signals in HV cable terminals [J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59 (11): 48-55, 64.
- [7] 杨芳,唐小亮,尹文阔,等. 基于多参量分布式光纤传感的架空输电线路风振监测分析[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(11):169-177.
YANG Fang, TANG Xiaoliang, YIN Wenkuo, et al. Analysis of

- transmission line wind vibration monitoring based on a multi parameter distributed optical fiber sensor[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(11):169-177.
- [8] 姚铮, 杨鑫, 蒋凌峰, 等. 35 kV 架空线路中并联间隙的单相同线安装方式[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(3): 241-251.
YAO Zheng, YANG Xin, JIANG Lingfeng, et al. The single-phase installation mode of parallel gaps in 35 kV overhead lines [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(3):241-251.
- [9] 苏超, 杨强. 基于多视图稀疏特征选择的架空输电线路故障原因判别[J]. 智慧电力, 2023, 51(3):96-103.
SU Chao, YANG Qiang. Fault cause identification of overhead transmission line based on multi-view sparse feature selection [J]. Smart Power, 2023, 51(3):96-103.
- [10] 朱家宁, 张诗钜, 葛维春, 等. 海上风电外送及电能输送技术综述[J]. 发电技术, 2022, 43(2):236-248.
ZHU Jianing, ZHANG Shitan, GE Weichun, et al. Overview of offshore wind power transmission and power transportation technology [J]. Power Generation Technology, 2022, 43(2): 236-248.
- [11] 钟启迪, 蒲莹, 孙建锋, 等. 适用于柔性直流电网的 500 kV 级直流电缆与架空线路并联运行控制及保护策略[J]. 电力建设, 2022, 43(7):80-86.
ZHONG Qidi, PU Ying, SUN Jianfeng, et al. Operation control and protection strategy of domestic 500 kV DC cable in flexible DC grid[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(7):80-86.
- [12] 郭亮, 杜欢, 王晓卫, 等. 基于磁场检测与多判据融合的架空线路接地故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(17):24-34.
GUO Liang, DU Huan, WANG Xiaowei, et al. Single phase to ground fault location method of an overhead line based on magnetic field detection and multi-criteria fusion [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(17):24-34.
- [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] 赵翔, 晏奇林, 闫丽萍. 多导体传输线高频场线耦合模型的研究综述[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(12):120201.
ZHAO Xiang, YAN Qilin, YAN Liping. Review of high-frequency field-to-line coupling models with multi-conductor transmission line [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(12):120201.
- [15] WANG Y S, LIU D Z, CAO Y S, et al. Evaluating field interactions between multiple wires and the nearby surface enabled by a generalized MTL approach [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2018, 60(4):971-980.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] TKATCHENKO S, RACHIDI F, IANOZ M. High-frequency electromagnetic field coupling to long terminated lines [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2001, 43(2):117-129.
- [19] 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.
- [20] LUGRIN G, TKACHENKO S V, RACHIDI F, et al. High-frequency electromagnetic coupling to multiconductor transmission lines of finite length [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2015, 57(6):1714-1723.
- [21] RACHIDI F. A review of field-to-transmission line coupling models with special emphasis to lightning-induced voltages on overhead lines [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2012, 54(4):898-911.
- [22] 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.
- [23] BRIDGES G E J, SHAFAI L. Plane wave coupling to multiple conductor transmission lines above a lossy earth [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1989, 31(1):21-33.
- [24] 王旭桐, 刘政, 秦锋, 等. 球面波传播的电磁脉冲下的架空线缆响应[J]. 高电压技术, 2022, 48(7):2770-2775.
WANG Xutong, LIU Zheng, QIN Feng, et al. Response of overhead cable under the electromagnetic pulse of spherical wave propagation [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(7): 2770-2775.

作者简介:



谢玮琛

谢玮琛(1998),男,硕士在读,研究方向为高频电磁场与电力系统架空多导体线路传输线耦合(E-mail:xieweichen@stu.xjtu.edu.cn);

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;

郑群爽(1999),男,硕士在读,研究方向为多级传输线高频耦合。

Flicker suppression optimization of DC arc furnace based on improved TS fuzzy algorithm

ZHU Mingxing^{1,2}, XU Luyao¹, GAO Min^{1,2}

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Anhui University, Hefei 230039, China;

2. Anhui University Green Industry Innovation Research Institute, Hefei 230601, China)

Abstract: In order to improve the flicker suppression performance of static var compensator (SVC) in response to impact loads such as DC electric arc furnace, a SVC rolling predictive control method based on the improved Takagi-Sugeno (TS) fuzzy algorithm is proposed. Firstly, the electrical model of DC electric arc furnace is established and its reactive power characteristics are simulated and analyzed. Then, an improved method of range adaptive correction is proposed to address the issue of abnormal output set to 0 when the classical TS fuzzy prediction algorithm is applied to fluctuating loads. This method can eliminate the outliers caused by the application mechanism of a class of algorithms, so as to improve the reliability and accuracy of TS fuzzy algorithm for reactive power prediction of fluctuating loads. Finally, based on the model training time constraint, a reactive power half-cycle rolling predictive control model is established to predict the reactive power 10 ms in advance. It is competent to improve the lag characteristics of the traditional SVC control system response. The simulation results show that the average flicker improvement rate of the proposed method increases by 54.17% compared with the traditional SVC control method, and the suppression effect of flicker phenomenon is significantly improved.

Keywords: Takagi-Sugeno (TS) fuzzy algorithm; DC arc furnace; static var compensator (SVC); predictive control; anomaly correction; flicker suppression

(编辑 钱悦)

(上接第 94 页)

High-frequency coupling current calculation model of overhead multi-conductor transmission lines in electric power system

XIE Weichen, GUO Jun, ZHENG Qunshuang, XIE Yanzhao

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

Abstract: Overhead transmission lines are the significant component of electric power system, where the over current can be coupled with the transient electromagnetic field or excitations (such as high-altitude electromagnetic pulse). As the coupling path of strong electro-magnetic interference, overhead transmission lines cause serious interference to the power system. Among the existing modelling methods, the classical transmission line theory may generate large error when dealing with the high-frequency coupling problem, where the cross dimension of the transmission line is not electrically small. Numerical full-wave method (such as moment of method) which relies on the grid subdivision with low efficiency when dealing with long transmission lines. Moreover, the number of cables is usually large in electric power system, and the ground are considered as the lossy ground. Therefore, to address the above mentioned problems, an asymptotic method is proposed to calculate the high-frequency coupling current along overhead transmission lines in electric power system. Based on the asymptotic theory with high calculation efficiency, the scattering and reflection process are introduced to quantify higher-order model components. In addition, the arbitrary number of wires, arbitrary parameters of the ground and different excitations are considered to derive the current expression. Finally, the validity and reliability of the proposed method are tested using the full-wave simulation and antenna irradiation experiment. The proposed method can quickly calculate high-frequency coupling current, which can provide theoretical basis and data support for protection and electromagnetic effect study of overhead transmission lines.

Keywords: overhead transmission lines; lossy ground; asymptotic method; high-frequency coupling current; full-wave numerical algorithm; antenna irradiation experiment

(编辑 吴楠)