

应用时域积分方程法分析复杂细线导体瞬态响应

刘杰, 赵志斌, 崔翔

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北省保定市 071003)

Analysis of Transient Response of Complex Thin Wire Structures by Using Time Domain Integral Equation Approach

LIU Jie, ZHAO Zhi-bin, CUI Xiang

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei Province, China)

ABSTRACT: Based on the method of moment (MOM) and marching on-in-time method (MOT), a new method solving the time domain integral equation (TDIE) was presented, which can analyze the transient response of the complicated electrical networks and those with lumped parameters electrical element effectively. The unknown variables were axis currents on the metal conductors, and piecewise linear function was selected as the basis function, applying subfield matching method to set up the time invariant matrix, which made the calculation process avoiding the matrix inverse operation, so as to decrease the complexity greatly. The results were compared with those obtained by the method of multi-conductor transmission lines (MTL) and frequency domain MOM, and the deviation was acceptable. This approach was applied to analyze the transient response of the buses in AIS to the switches operation.

KEY WORDS: complex thin wire structures; time domain integral equation; method of moment; transient electromagnetic response

摘要: 应用时域积分方程法(time domain integral equation, TDIE)分析细线导体的瞬态响应, 将矩量法与时间步进算法相结合, 提出了一种新的TDIE求解方法。该方法以导体段的轴向电流为变量, 选用分段线性函数为基函数, 采用分域匹配法构造线性方程组, 形成一个不随时间变化的系数矩阵, 从而避免了时间步进过程中的矩阵求逆运算, 极大地提高了运算效率。选用分域匹配法, 空间步长可以适当加大, 与常用的点匹配法相比, 采用更少的分段数, 就可以获得同样高的计算精度。此外, 作为一种直接时域方法, 该方法可以在充分完善地考虑集中参数源和负载的基础上高效快速分析复杂结构导体的瞬态早时响应。将该文计算方法与频域

矩量法和多导体传输线方法针对同一个算例进行计算, 结果均一致, 从而验证了该文方法的正确性。最后, 应用所提方法分析了变电站内开关操作时, 母线上的瞬态电磁响应。

关键词: 复杂细线导体; 时域积分方程; 矩量法; 瞬态电磁响应

0 引言

近年来, 瞬态电磁干扰的分析和研究作为电磁兼容研究的重要内容, 引起了人们更多的重视^[1]。在电气工程领域, 随着电网规模的扩大, 输电线路电压等级的提高, 特别是随着我国超高压和特高压输电线路的建设和运行, 使电力设备所处的电磁环境日益恶劣。开关操作^[2-3]、雷击^[4-5]、静电放电^[6-7]都会产生持续时间短、幅值高的瞬态电磁脉冲, 因而准确分析供用电设备对瞬态电磁场的响应, 对于电磁兼容设计、测量、仿真都具有重要意义。

文献[8]基于频域矩量法, 提出了一种适合于分析变电站内开关操作时母线、设备间连线、架空线路产生的电磁场计算方法, 与快速傅里叶变换相结合, 实现了变电站空间瞬态电磁场的计算。但频域方法应用于瞬态早时响应分析, 需要计算很宽频率的响应, 耗时长, 占用内存大, 因此, 应用直接时域方法分析暂态问题更为适合^[9]。

目前, 分析线结构导体瞬态响应的时域方法主要有3种: Bergeron方法^[10], 并以此为基础开发了EMTP-ATP软件; 基于一维有限时域差分(finite difference time domain, FDTD)算法的多导体传输线(multi-conductor transmission lines, MTL)方法^[11-12]和时域有限元法^[13](time domain finite element method, TDFE)。但这3种方法共同的理论基础都是传输线理论, 即求解的对象都是传输线电报方

基金项目: 国家自然科学基金项目(50577019, 60601013)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50577019, 60601013).

程, 因求解方程所采用的数学工具不同, 而形成的不同理论方法。然而, 在实际应用时它们仅适用于相互平行的导体结构, 对于垂直导线结构以及其他复杂导体则不能处理。

除此之外, Bergeron 方法将传输线等效为诺顿电路或戴维南电路, 按电路理论进行计算^[14], 因此限制了它只能求解传输线两端的响应; MTL方法对含集中参数网络的线路不能直接计算, 需要另外花费相当大的精力求解集中参数网络的状态方程^[15]。

文献[16]提出了基于三维 FDTD 求解线路瞬态响应的方法, 但需要对计算域进行全空间离散, 并设置吸收边界条件, 对于大尺度问题和远场问题, 需要耗费大量计算成本, 且求解过程复杂。

时域积分方程法在分析细线结构的散射、辐射问题中, 有着广泛应用和显著优点^[17]。本文应用 TDIE 分析细线导体的瞬态响应, 将矩量法^[18]与时间步进算法相结合, 并充分考虑系数阵建模方式, 提出了一种求解快速、适用于复杂模型的分析方法。

该方法以导体段的轴向电流为变量, 选用分段线性函数为基函数, 采用分域匹配法构造线性方程组, 形成了一个不随时间变化的关系矩阵, 从而避免了时间步进过程中的矩阵求逆运算, 极大地提高了运算效率。选用分域匹配法, 空间步长可以适当加大, 因此采用较少的分段数就可以获得较高的计算精度。此外, 作为一种直接时域方法, 该方法可以高效求解瞬态早期响应, 可以充分地考虑集中参数源和负载的建模方式, 并适合于分析复杂结构导体。将本文计算方法与频域矩量法和多导体传输线方法针对同一个算例进行计算, 结果均一致, 从而验证了本文方法的正确性。最后, 应用本文方法分析了变电站内开关操作时, 母线上的瞬态电磁响应, 并对响应特性进行了分析。

1 计算方法

1.1 细线导体时域积分方程的建立

首先分析自由空间中的理想导体, 为便于公式推导和计算, 可对该细线导体作如下近似^[19]: 1) 假定入射电场沿着导体圆周是相同的, 电流只沿导线轴向分布; 2) 电流和电荷密度可以近似地认为是导体轴线上的电流 I 及在导线轴上的电荷 σ ; 3) 只对导线表面上电场的轴向分量使用边界条件。

根据散射理论, 在每个直导体段的表面, 入射场电场强度与散射场电场强度的切向分量相等^[20], 即

$$\mathbf{E}_i^j = \partial \mathbf{A}_j / \partial t + \partial \varphi / \partial l \quad (1)$$

式中: \mathbf{E}_i^j 为导体表面的入射场电场强度, V/m; \mathbf{A} 为轴向电流在导体表面产生的矢量磁位, Wb/m; φ 为线电荷在导体表面产生的标量电位, V; l 为导体表面轴线方向。

在无限大自由空间中有

$$\mathbf{A}_l(l, t) = \frac{\mu}{4\pi} \int_{l'} \frac{I(l', t - R/c)}{R} dl' \quad (2)$$

$$\varphi(l, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \int_{l'} \frac{q(l', t - R/c)}{R} dl' \quad (3)$$

式中: μ 为导体所在空间的磁导率, H/m; ϵ 为导体所在空间的介电常数, F/m; $R = |l - l'|$ 为场点到源点的距离, m; l' 为导体轴线坐标。

将式(2)和式(3)代入式(1)即可得到自由空间中细线导体的时域积分方程。为了更好地处理复杂结构线路, 将式(1)两端同时对场点进行积分, 则方程右端第 2 项可进行如下运算:

$$\int_l (\partial \varphi / \partial l) dl = \int_l (\partial \varphi / \partial l) dl = \varphi(l_e, l', t) - \varphi(l_s, l', t) \quad (4)$$

式中 l_s 和 l_e 分别表示各段导体的起点和终点, 将式(4)代入经积分运算的式(1), 可得

$$V^s(t) = \frac{\partial \Phi(t)}{\partial t} + \varphi(l_e, t) - \varphi(l_s, t) \quad (5)$$

式中: $V^s(t) = \int_l \mathbf{E}_i^s(l, t) dl$; $\Phi(t) = \int_l \mathbf{A}_l(l, t) dl$ 。

1.2 基函数的选择

将标量电位对时间求导数:

$$\psi = \partial \varphi(l, t) / \partial t = \frac{1}{4\pi\epsilon} \int_{l'} \frac{\partial q / \partial t}{R} dl' \quad (6)$$

又因为 $\partial q / \partial t = -\partial I / \partial l'$, 则式(6)等价于:

$$\psi = -\frac{1}{4\pi\epsilon} \int_{l'} \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial}{\partial l'} I(l', t - R/c) dl' \quad (7)$$

这样式(5)就被改造为仅以导体轴线电流为未知量的方程, 选用一组基函数来近似表达轴线电流, 就可以应用矩量法求解上述时域电场积分方程, 本文选用分域基, 将导体轴线分为 N 段, 每段采用线性函数作为基函数:

$$I(l') = a(l' - l'_0) + b \quad (8)$$

式中: a 、 b 为未知数; l'_0 为导体轴线起点坐标。

1.3 权函数的选择

本文选用分域匹配法对式(5)进行加权运算, 以某段导体表面中点为起点, 以相邻段导体表面中点为终点, 构造位函数的计算段, 如图 1 所示, 因此, 空间加权函数为

$$\omega_i(l) = \begin{cases} 1, & l_{i-1} < l < l_i \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

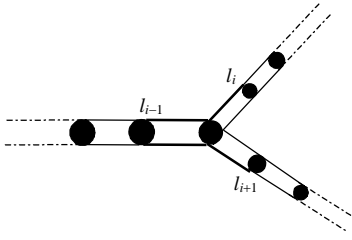


图1 位函数的计算段示意图

Fig. 1 Sketch of the segment to calculate the function of potential

式中 l_i 表示导体表面各段中点的坐标。与点匹配法相比,这种加权方式可以显著提高空间步长,因而能够有效减少分段数,提高计算效率;同时,不受导体空间布置形式的限制,适用于复杂导体的情况。应用时间步进法,在各计算段对时间进行离散,加权函数选为

$$\omega_j(t) = \delta(t - t_j) \quad (10)$$

若导体被分为 N 段,具有 M 个节点,则可以构造 $2N-M$ 个计算段,对每个计算段的积分方程进行加权运算,并以差分运算近似微分运算,可以形成 $2N-M$ 个线性无关的方程:

$$V_{i,j}^s = (\Phi_{i,j} - \Phi_{i,j-1}) / \Delta t + \varphi_{i,j} - \varphi_{i-1,j} \quad (11)$$

1.4 方程的求解

将基函数表示的导体轴线电流带入式(11),可以得到如下表达式:

$$a_{k,j}(K_{i,k}^a - \Delta K_k^p \Delta t^2) + b_{k,j} K_{i,k}^b = V_{i,j}^s(\Delta t) - (\Phi_{i,j}^D - \Phi_{i,j-1}^D) - (\Delta \varphi_{i,j-1} + \Delta t \cdot \Delta \psi_{i,j}^D) \Delta t \quad (12)$$

式(12)用矩阵表示为

$$\begin{bmatrix} K_{11}^a - \Delta K_{11}^p \Delta t & \cdots & K_{11}^b & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \cdots & K_{ee}^a - \Delta K_{ee}^p \Delta t & \cdots & K_{ee}^b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_N \\ b_1 \\ \vdots \\ b_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 \\ \vdots \\ B_e \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中:

$$\Phi_{i,j}^D = \sum_{k=1, k \neq i}^N a_{k,j-n} K_{i,k}^a + b_{k,j-n} K_{i,k}^b \quad (14)$$

$$\psi_{i,j}^D = - \sum_{k=1, k \neq i}^N a_{k,j-n} K_k^p \quad (15)$$

$$n = [R/c/\Delta t] \quad ([] \text{为取整符号}) \quad (16)$$

$$K_{i,k}^a = \frac{\mu}{4\pi} \int_{l_i} \int_{l'_k} \frac{l' - l'_{0k}}{R} dl' dl \quad (17)$$

$$K_{i,k}^b = \frac{\mu}{4\pi} \int_{l_i} \int_{l'_k} \frac{1}{R} dl' dl \quad (18)$$

$$K_k^p = - \frac{\mu}{4\pi} \int_{l'_k} \frac{1}{R} dl' \quad (19)$$

式(12)左侧系数阵,只体现与导体表面计算段时间延迟为零的导体轴线电流分段对场的贡献,时间延迟不为零的轴线电流分段的贡献,全部体现在矩阵右侧列向量中。

K^a 和 K^b 均由二重积分计算得到,但这2个二重积分与时间无关,且不会由于时间步长的改变而反复计算,也不受时间步进过程的影响,因此在求解过程中只需计算1次,因此并不会显著增加计算量。

对于任意形式布置的导体,式(17)~(19)需要进行空间曲线积分运算,计算量比较大。如果借助坐标变换,分别沿场线段和源线段建立局部坐标系,使其分别与局部坐标系的某坐标轴重合,曲线积分就可以转化为二重积分,极大地减少计算量。

对 M 个节点分别应用KCL定律,可以形成 M 个方程,用矩阵表示:

$$\begin{bmatrix} \cdots & -1 & \cdots \\ \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \Delta l & 0 & \cdots & 1 & -1 \\ \cdots & \cdots & \Delta l & \cdots & \cdots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_N \\ b_1 \\ \vdots \\ b_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

式中 Δl 为线路每个分段的长度。

联立式(13)、(20)可以构成 $2N$ 个方程,记作:

$$\mathbf{K}\mathbf{I} = \mathbf{B} \quad (21)$$

应用矩阵求逆的方法求解式(21),就可获得 N 个分段的未知系数 a 和 b 。从 \mathbf{K} 矩阵中各个元素的定义可以看出,它是一个不随时间变化的系数矩阵,在全部求解过程中,其建立和求逆均只需一次。一旦计算得出,在时间步进过程中反复调用即可,因此显著减少了计算量,提高了求解速度。

1.5 考虑大地影响

大地视为完纯导体时,它对于处在其上方导体的影响可用镜像导体来等效。若导体水平布置,镜像导体电流与原导体电流大小相等,方向相反;若导体垂直布置,镜像导体电流与原导体电流大小相等,方向相同,如图2所示。

如前所述,式(21)左端系数阵 \mathbf{K} 只体现与导体表面计算段时间延迟为零的导体轴线电流分段对场的贡献以及节点电流连续性方程,因此,引入镜像导体电流并不会影响方程的左端项,即式(21)中的 \mathbf{K} 矩阵无需改变,这也是本文方法的又一优势。镜像导体的作用只体现在式(13)矩阵右端列向量的

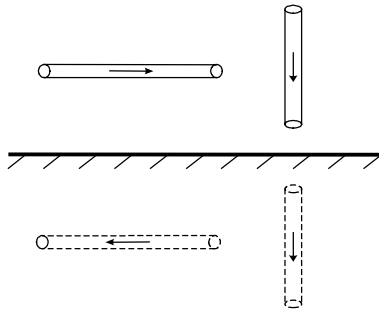


图 2 考虑大地影响时的示意图

Fig. 2 Sketch considering effect of the earth

构造过程中。

1.6 集中参数元件的处理

实际中，线路终端一般是带有集中参数激励或负载，本文方法只需对 K 矩阵做细微调整，就可以方便地处理各种集中参数元件，下面以端接电压源激励为例加以阐述。若在第 s 段加入电位源 $\varphi_s(t)$ ，电位源对时间的导数记作 $\psi_s(t)$ 。第 s 个 KCL 方程需进行改造， K 矩阵和 B 矩阵第 s 行去掉，分别记作 K' 和 B' 。增设该点电位对时间的导数 ψ 为未知量，各段导体轴线电流在该点产生的标量电位导数之和应该等于电位源的导数，用方程表示为

$$-\Delta K_{ss}^p a_s - \psi = \sum_{k=1, k \neq i}^N a_{k,j-n} K_k^p \quad (22)$$

$$\psi = \psi_s \quad (23)$$

用矩阵表示：

$$\left[\begin{array}{ccc|c} K' & & & 0 \\ \dots & -\Delta K_{ss}^p & \dots & -1 \\ & 0 & & 1 \end{array} \right] \begin{bmatrix} I \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B' \\ \psi_s^D \\ \psi_s \end{bmatrix} \quad (24)$$

2 算法验证

2.1 电流源激励下计算结果的对比

为了验证本文方法的有效性，应用本文计算方法与文献[11]提供的多导体传输线计算方法以及 CDEGS 软件分别计算了同一模型的瞬态响应。CDEGS 是基于文献[21]开发的商业软件，其核心算法为频域矩量法。

导体长 10 m，半径为 0.005 m，距地高度 10 m，一端悬空，另一端加入高斯脉冲形式的电流源，如图 3 所示。电流源表达式为 $E(t) = E_0 \exp[-(t-t_0)^2/\tau^2]$ ，其中， $E_0=100$ A； $t_0=4.5$ μ s； $\tau=9$ μ s。应用 TDIE 方法，CDEGS 软件和一维 FDTD 方法分别计算导体中点电流，结果如图 4 中所示，可以看出，TDIE 方法和一维 FDTD 方法符合的很好，而 CDEGS 的结果与二者的偏差略大，这主要是由于频域离散存在一定的频谱泄露。

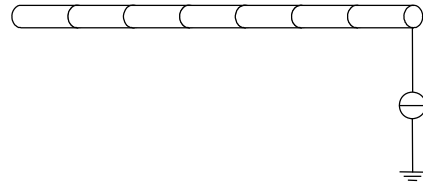


图 3 计算模型 I

Fig. 3 Computation model I

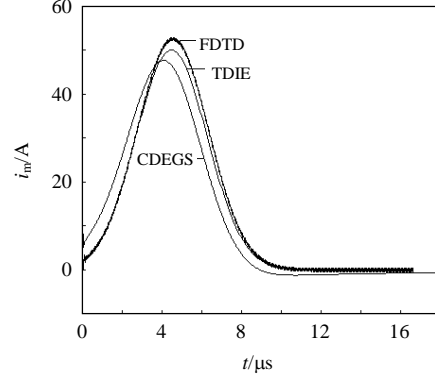


图 4 导体中点电流

Fig. 4 Current of the conductor middle

2.2 电压源激励下计算结果的对比

电力系统中最常见的激励形式为电压源，为此，本文也考察了应用 TDIE 方法计算电压源激励下架空导体瞬态响应的准确性。导体长 50 m，半径 0.005 m，距地高度 10 m，一端加 50 Ω 的电阻，另一端加三角型的电压源，如图 5 所示。电压源的上升时间为 0.1 μ s，下降时间为 0.05 μ s。分别应用 TDIE 方法和一维 FDTD 方法计算上述模型，导体中点电压波形如图 6 所示，可见 2 种方法的计算结果符合得很好。

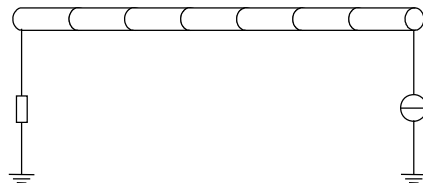


图 5 计算模型 II

Fig. 5 Computation model II

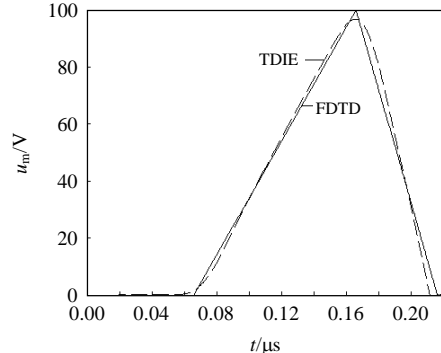


图 6 导体中点电压

Fig. 6 Voltage of the conductor middle

经验证, 本文方法与其他方法的结果均符合较好, 说明本文方法能够很好地计算出不同条件下细线导体的瞬态响应。

本文方法的计算耗时远小于频域分析方法, 但略长于一维 FDTD 方法, 但本文方法不仅能够分析这些简单导体的瞬态响应, 更可以分析任意布置的复杂结构在各种形式外加激励作用下的瞬态电磁响应, 而这些是 FDTD 无法处理的, 为此而付出一定的计算代价也是可以接受的。

从本节以及下一节的各个算例中可以看出, 本文方法可以分析激励源上升时间在微秒级甚至是纳秒级的瞬态电磁响应问题, 因此可以充分满足电力系统的工程需要。由于时间离散过程采用了时间步进法, 随着计算时间的增加, 本文方法会出现后时不稳定, 为此文献[17]和[22]都提出了解决方案, 且效果显著。

3 方法应用

变电站开关操作是电力系统严重的瞬态电磁干扰源。图 7 为变电站内空载母线合刀闸操作的计算模型。对于存在垂直线路的计算模型, 如果应用 EMTP 软件或多导体传输线等时域方法进行分析, 都需要将垂直部分忽略, 这就势必将引起误差, 而本文方法可以很好地处理这类模型。

在图 7 的模型中, 母线高度 15 m, 母线间距为 5 m, 半径为 0.05 m, 长 60 m, 隔离开关闭合后, A、B、C 三相电压经 2 m 长的垂直线路向母线供电, 电压注入位置距母线首端 20 m。在母线充电的过程中, 设空载母线初始电压和初始电流均为零, 且合闸时电压有 0.1 μs 的上升时间, 并在 A 相电压最大时合闸。图 8、9 分别给出了垂直引线与母线连接处的三相电流和电压波形, 图 10、11 分别给出了母线首端和末端三相电压的变化波形。

当 A 相电压相位为 0° 时, A 相电压为 179.6 kV, B 和 C 相电压为 89.8 kV。当向母线充电时, 随着

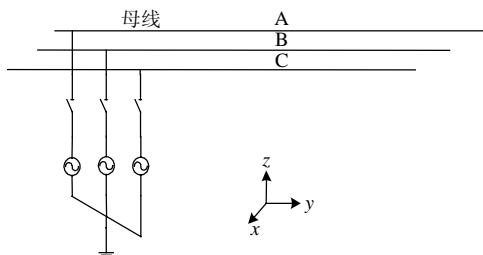


图 7 变电站母线供电模型
Fig. 7 Model of supplying power to bus bar in the substation

时间的变化, 电压在母线上的各点传播, 约经过 0.067 μs 到达母线首端, 经过 0.133 μs 到达母线的

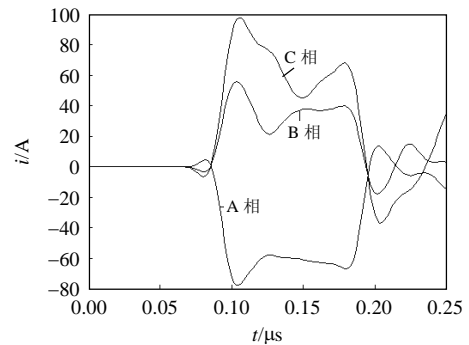


图 8 连接处电流波形

Fig. 8 Current waveform at the joint

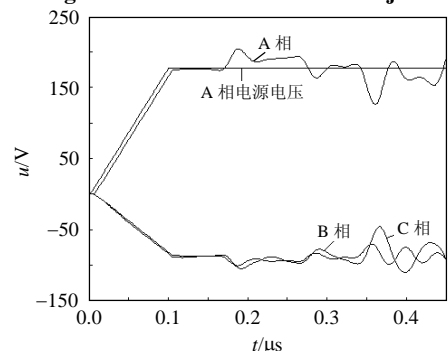


图 9 连接处电压波形

Fig. 9 Voltage waveform the at the joint

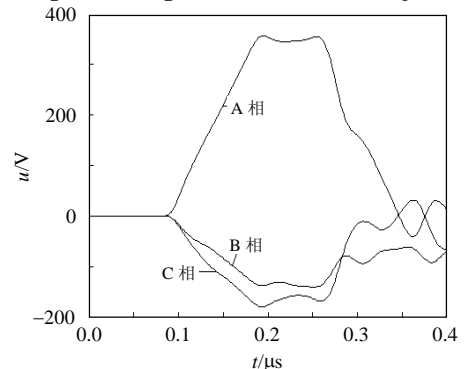


图 10 母线首端电压波形

Fig. 10 Waveform of the supply terminal voltage of the bus

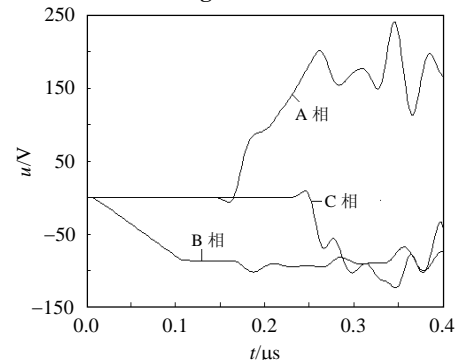


图 11 母线终端电压波形

Fig. 11 Waveform of the terminal voltage of the bus

末端,这与图 10、11 中波形显示的结论一致。

图 9 标示出了注入电压源的 A 相电压,与连接处的 A 相电压对比可知,由于传播的延时,连接点处电压存在滞后效应,同时由于线路上的多次折返射,在连接点处电流和电压波形都存在比激励电压更丰富的频谱。具体分析,在线路连接处及母线首末端由于阻抗不匹配,这些位置存在着反射和透射,使母线电压和电流产生振荡。从图 10 可以看出,电压最大值约为注入电压的 2 倍,从线路的几何结构进行分析,电压在线路开路处反射系数为 1,即经过反射后的电压变为原来的 2 倍;线路交接处,由于反射和透射作用,电压、电流的增大和剧烈变化是合理的。

需要说明的是,以上计算结果是在假设导体无损、大地为理想导体情况下获得的,虽然没有考虑土壤有损的情况,但其波过程的规律是类似的。

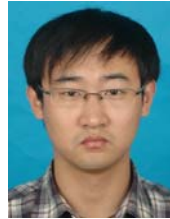
4 结论

本文提出了一种应用时域积分方程法分析复杂细线导体瞬态响应的求解方法。该方法以导体段的轴向电流为变量,选用分段线性函数为基函数,采用分域匹配法构造线性方程组,形成了一个不随时间变化的关系矩阵,从而避免了时间步进过程中的矩阵求逆运算,极大地提高了运算效率。选用分域匹配法,空间步长可以适当加大,因此采用较少的分段数就可以获得较高的计算精度,可以充分地考虑集中参数源和负载的建模方式,并适用于具有垂直和弯折结构的复杂细线导体,可以对变电站开关操作时,母线电压和电流波过程进行准确、高效的预测计算。

参考文献

- [1] 崔翔. 2002 年国际大电网会议系列报道-电力系统电磁兼容研究进展[J]. 电力系统及其自动化, 2003, 27(4): 1-5.
Cui Xiang. A review of CIGRE ' 2002 on power system electromagnetic compatibility[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(4): 1-5 (in Chinese).
- [2] 卢斌先, 王泽忠, 李成榕, 等. 500kV 变电站开关操作瞬态电场测量与研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 16-19.
Lu Binxian, Wang Zezhong, Li Chengrong, et al. Measurements and research of switching operation transient electric field in 500 kV substations[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 16-19(in Chinese).
- [3] 齐磊, 崔翔. 变电站开关操作对屏蔽电缆电磁干扰的预测[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(9): 46-51.
Qi Lei, Cui Xiang. Prediction of electromagnetic interference on the shielded cable due to the switching operation in substation [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(9): 46-51 (in Chinese).
- [4] Shoory A, Rouzbeh Moini S H, Sadeghi H, et al. Analysis of lightning radiated electromagnetic fields in the vicinity of lossy ground [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2005, 47(1): 131-145.
- [5] Petrache E, Rachidi F, Paolone M, et al. Lightning-induced disturbances in buried cables, part I: theory[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2005, 47(3): 498-508.
- [6] 朱长青, 刘尚合, 魏明. ESD 辐射场测试研究[J]. 电子学报, 2005, 33(9): 1701-1705.
Zhu Changqing, Liu Shanghe, Wei Ming. A study on test & measurement of the Radiated Field by ESD[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(9): 1701-1705.
- [7] Ker Mingdou, Chang Weijen. ESD protection design with on-chip ESD bus and high-voltage-tolerant ESD clamp circuit for mixed-voltage I/O buffers[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Devices, 2008, 55(6): 1409-1416.
- [8] 赵志斌, 崔翔, 张波, 等. 应用矩量法计算变电站内的空间电磁场[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(11): 148-153.
Zhao Zhibin, Cui Xiang, Zhang Bo, et al. The electromagnetic field calculation in substation by the method of moment[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(11): 148-153.
- [9] Li Lijuan, Li Lin, Gao Changzheng, et al. Numerical treatment for time domain integral equations of thin wire structures in half-space configuration[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44(6): 774-777.
- [10] 吴维韩, 张芳榴. 电力系统过电压数值计算[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 19-38.
- [11] 卢铁兵, 崔翔. 变电站空载母线波过程的数值分析[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(6): 39-42.
Lu Tiebing, Cui Xiang. Numerical analysis of wave processes for buses without load in substations using FDTD[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(6): 39-42(in Chinese).
- [12] 齐磊, 卢铁兵, 崔翔. 基于时域有限差分法的非均匀多导体传输线瞬态分析[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 102-106.
Qi Lei, Lu Tiebing, Cui Xiang. Transient analysis for nonuniform multiconductor transmission lines based on the FDTD method [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 102-106(in Chinese).
- [13] 刘磊, 崔翔, 齐磊. 时域有限元法求解传输线瞬态波过程[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(3): 112-118.
Liu Lei, Cui Xiang, Qi Lei. Transients analysis of transmission line by time domain finite element method[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(3): 112-118.
- [14] Teshce F M, Ianoz M V, Kartsson T. EMC analysis methods and computation models[M]. New York: John Wiley & Sons Press, 1996: 275-282.
- [15] Antonio Orlandi, Paul C R. FDTD analysis of lossy, multi-conductor transmission lines terminated in arbitrary loads[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1996, 38(3): 388-399.
- [16] 王泽忠, 李云伟, 卢斌先, 等. 变电站瞬态电磁场耦合二次电缆数值方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(3): 107-111.

- Wang Zezhong, Li Yunwei, Lu Binxian, et al. Study on numerical method of transient electromagnetic field coupling to secondary cable in substations[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(3): 107-111.
- [17] 赵延文, 聂在平, 徐建华, 等. 精确稳定求解时域电场积分方程的一种新方法[J]. 电子学报, 2006, 34(6): 1104-1108.
- Zhao Yanwen, Nie Zaiping, Xu Jianhua, et al. A new method for stable and accurate solution of time-domain electric field integral equation[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(6): 1104-1108.
- [18] Harrington R F. Field computation by moment methods[M]. New York: Macmillan, 1968: 20-100.
- [19] Rao S M. Transient electromagnetics[M]. New York: Academic Press, 1999: 49-73.
- [20] Moini R, Kordi B, Abedi M. Evaluation of LEMP effects on complex wire structures located above a perfectly conducting ground using electric field integral equation in time domain [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1998, 40(2): 154-162.
- [21] CIGRE Working Group 36.04. Guide on EMC in power plants and substations[R]. Paris: Conference International des Grands Reseaux Electriques, 1997.
- [22] 姜光兴, 曹伟, 朱洪波. TD-EFIE 分析任意几何形状导体的瞬态特性[J]. 电子学报, 2006, 34(4): 741-745.
- Jiang Guangxing, Cao Wei, Zhu Hongbo. TD-EFIE approach to transient analysis for arbitrarily shaped conductors[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(4): 741-745.



刘杰

收稿日期: 2009-01-12。

作者简介:

刘杰(1984—), 男, 硕士研究生, 现从事电力系统电磁兼容的研究, emc_liujie@163.com;

赵志斌(1977—), 男, 博士, 副教授, 现从事电力系统电磁兼容的研究;

崔翔(1960—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电磁场理论及其应用、电力系统电磁兼容和光纤传感与传输技术。

(责任编辑 王剑乔)