

输电线路暂态计算与分析方法的发展与展望

王大鹏¹, 魏佩瑜², 王婧², 哈恒旭², 邹本国¹

(1. 山东电力研究院, 山东 济南 250014; 2. 山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博 255049)

摘要: 着重对高压输电线路暂态分析与计算模型进行了分析和总结, 指出了目前基于特征法的电磁暂态计算模型的缺陷。在综述输电线路数学模型及故障暂态分析方法的基础上, 提出一种利用投影变换算子理论而建立的暂态分析和计算新思路和方法。利用函数逼近理论、投影变换理论和多分辨分析理论将输电线路电报方程组投影到由一个关于时间变量 t 的基函数, 在某个二进分辨率下通过位移张成的函数空间中, 从而得到一个只关于距离变量 x 的向量微分方程组。同时也指出了基于此方法的输电线路暂态分析与计算需要解决的几个关键问题和研究思路。

关键词: 输电线路; 投影变换算子; 函数空间; 故障暂态分析

Development and prospect of transmission line transient analysis and calculation theories

WANG Da-peng¹, WEI Pei-yu², WANG Jing², HA Heng-xu², ZOU Ben-guo¹

(1. Shandong Research Institute of Electric Power System, Jinan 250014, China;

2. Dept of Electric & Electronics Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract: With this new method, which is based on function approaches theory, projection operator theory and multiresolution analysis, the telegraphic equation can be projected into a function space, which is spanned by the basis function relates to variable t in an given binary resolution, and then an vector equations with only one variable of distance x is presented. Through the theoretical analysis, this approach can overcome two drawbacks of the traditional characteristic method. Meanwhile, the prospect based on this method is described in the paper.

Key words: transmission line; projection operator; function space; fault transient analysis

中图分类号: TM711

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)06-0010-06

0 引言

随着电力系统规模的日益扩大, 输电电压等级的不断提高, 特高压远距离输电线路的建设和发展, 线路故障后产生的电磁暂态过程也越来越受到人们的重视。首先, 目前的线路保护装置都是基于线路的简单 RL 串连模型, 利用故障后的工频分量构成的保护原理, 长线路的分布参数引起的故障暂态过程更加剧烈, 而且持续时间也越来越长, 这必然会对现有的线路保护原理提出了挑战^[1,2]: 一方面保护需要躲避暂态过程带来的暂态超越现象, 另一方面特高压大电网需要保护进一步的提高动作速度。其次, 人们越来越注意到, 故障后的暂态分量中包含丰富的故障位置、故障类型、故障性质等重要故障信息, 如果能充分利用故障暂态信息, 不仅可以构造高性能的线路保护新原理, 而且可以构

造精确的故障测距、自适应重合闸等新原理。因此, 高压远距离的输电线路故障后的电磁暂态过程分析和计算及其方法的研究非常必要。

本文首先对目前的输电线路暂态计算方法进行了分析和总结, 目前电力系统输电线路暂态分析与计算仍然基于laplace变换的“特征法”, 该方法具有两大缺陷, 其一是计算复杂, 计算中存在大量的卷积积分计算, 不适合在线快速计算, 其二是拉氏变换是一个纯频域变换, 所得暂态解没有时间分辨, 而暂态过程恰恰是随着时间的变化而变化的(行波在不断的发生折反射)。在此基础上本文提出了一种新的高压输电线路的暂态分析和计算方法。根据函数逼近理论、投影变换理论以及微分算子理论, 将线路的电报方程投影到由一个关于时间 t 的基函数, 在某个二进分辨率下通过位移张成的函数空间中, 从而得到只关于距离 x 的一阶向量

线路方程组。理论分析表明, 该方法能够解决传统的基于Laplace变换的“特征法”计算复杂, 不利于分析故障暂态过程的缺点。最后, 本文指出了基于投影算子理论的输电线路电磁暂态分析计算新模型的未来研究的几个关键问题, 建立和完善新的输电线路暂态计算模型, 为电力系统电磁暂态计算、输电线路故障测距以及继电保护新原理提供理论支持。

1 输电线路暂态分析与计算模型概况

输电线路暂态过程分析的核心是对线路基于分布参数的电报方程的解的分析:

$$-\frac{\partial u(x,t)}{\partial x} = R_0 i(x,t) + L_0 \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} \quad (1a)$$

$$-\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} = G_0 u(x,t) + C_0 \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} \quad (1b)$$

其中: R_0 、 G_0 、 L_0 、 C_0 分别为线路的分布电阻、电感和对地电导和电容。

1.1 无损线路的暂态分析及计算模型

暂态过程的分析是从无损线路波过程开始的(即 $R_0 = G_0 = 0$), 根据线路传输的电报方程的达朗贝尔解和行波传播理论:

该方程的解由两部分组成(前行波和反行波):

$$u(x,t) = f_1(x-vt) + f_2(x+vt) \quad (2a)$$

$$i(x,t) = f_1(x-vt)/Z_c - f_2(x+vt)/Z_c \quad (2b)$$

式中: 行波传播速度为 $v = 1/\sqrt{L_0 C_0}$, $Z_c = \sqrt{L_0/C_0}$ 是线路波阻抗, $f_1(x-vt)$ 是指一个前行电压波(forward wave), $f_2(x+vt)$ 则是指反向电压波(backward wave)。

早在 1933 年, L.V.Bewley 建立了无损线路的时域网格分析法, 可以求解出线路上任意一点的电压电流。Bergeron 根据这个分析方法构造了线路的等值计算模型——贝瑞隆计算模型^[3]。该模型为利用分步积分法求解电力系统暂态过程奠定了基础, 贝瑞隆模型是根据无损线路的前行波和反行波在线路上的传播特性得到的:

$$u_m(t) - Z_c i_m(t) = u_n(t-T) + Z_c i_n(t-T) \quad (3a)$$

$$u_n(t) - Z_c i_n(t) = u_m(t-T) + Z_c i_m(t-T) \quad (3b)$$

$T = l/v$ 为行波在线路上的传播时间, l 为线路长度, $v = 1/\sqrt{L_0 C_0}$ 为行波传播速度。

Bewley 网格分析法和贝瑞隆等值计算模型是

基于无损线路的暂态分析和计算方法。

1.2 有损线路的暂态分析及计算模型

当考虑线路损耗时, 线路波阻抗 Z_c 及线路传播参数 γ 均为频率相关的变量。这时, 线路的电报方程可以通过 Laplace 变换来求解, 将电报方程两边进行拉氏变换, 将二维变量的方程转化为一维变量的二次微分方程, 这种方法称之为特征法(Characteristic method), 其在频域内的解为行波的频域传播方程:

$$U_m(\omega) - Z_c I_m(\omega) = A(\omega)[U_n(\omega) + Z_c I_n(\omega)] \quad (4a)$$

$$U_n(\omega) - Z_c I_n(\omega) = A(\omega)[U_m(\omega) + Z_c I_m(\omega)] \quad (4b)$$

其中: $A(\omega) = \exp(-\gamma l)$ 为线路传播函数, $\gamma(\omega) = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0)}$ 为线路传播参数, $Z_c(\omega) = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)/(G_0 + j\omega C_0)}$ 为线路波阻抗。

对于有损线路, 又分为有畸变的和无畸变两种线路, 下面分别讨论之。

1.2.1 无畸变线路的暂态分析

对于无畸变线路, 其参数满足 $R_0/L_0 = G_0/C_0$, 则 $\gamma(\omega) = \sqrt{L_0 C_0}(R_0/L_0 + j\omega)$ 。相应传播函数

$$A(\omega) = \exp(-\gamma l) = \exp(-R_0 l / Z_c) \exp(-j\omega l / v)$$

其转化为时域表达式为:

$$a(t) = \exp(-R_0 l / Z_c) \delta(t - l/v)$$

由上式可知波阻抗和波的传播速度与无损线路相同。因此对于无畸变线路考虑损耗后的传输关系与公式 3 相似, 只是在其等号右侧乘上一个衰减因子 $\exp(-R_0 l / Z_c)$ 。

1.2.2 畸变线路的暂态分析

对于畸变线路, 由于波阻抗参数和传播函数都是频率 ω (或 s) 的函数, 在频域内相乘等价于时域内的卷积, 因此对于畸变线路的计算, 其核心在于如何将波阻抗和传播函数转化为时域表达式。将常见的几种方法归纳如下:

a. 1969 年, 由于信号处理技术还不是很成熟, 因此加拿大学者 H. W. Dommel 建议把有损线路分成两部分, 用三个集中电阻(阻值分别为 $R/4$ 、 $R/2$ 、 $R/4$) 来等效模拟线路损耗, 两段线路仍然作为无损线路处理^[4], 并利用这个模型开发了第一套电磁暂态计算软件(Electro-Magnetic Transient Program), 然而用这个模型模拟畸变线路显然比较粗糙, 计算也不够精确。

b. 文献[5, 6]提出将线路波阻抗和传播函数

用泰勒级数展开为关于 s 的有理多项式的级数和的形式 (以波阻抗为例):

$$Z_c(s) = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \left(\sqrt{\frac{1+(R_0/L_0)s^{-1}}{1+(G_0/C_0)s^{-1}}} \right) = Z_{c0}(1+m_1s^{-1}+\dots+m_ns^{-n}+\dots) \quad (5)$$

然后将之拟合为有理多项式的分式形式:

$$Z_c(s) \approx Z_{c0} \frac{a_0+a_1s+\dots+a_Ns^N}{b_0+b_1s+\dots+b_Ns^N} \quad (6)$$

利用波阻抗和传播函数的 Mclarant 级数的系数来确定有理多项式分式的系数 $\{a_k\}$ 和 $\{b_k\}$, 然后确定其零点和极点, 求出其时域内的拉氏反变换表达式。这个方法对于分析和计算那些不考虑集肤效应的线路是可行的, 尽管在时域内的卷积计算很复杂。

c. 当考虑线路的集肤效应时, 即线路的分布参数是频率相关的, 在 20 世纪 80 年代初, J. Marti 利用 Fourier 变换 (Laplace 变换) 理论, 用有理多项式分式对频率相关的传播函数和波阻抗进行了拟合, 通过计算估计线路波阻抗和传播函数的零点和极点, 并利用 Fourier (Laplace) 反变换得到输电线路的基于频率相关参数的计算模型^[7,8]。该方法仍然用 Pade 拟合方法 (公式 6), 但由于参数的频率相关特性, 公式 5 不成立。Marti 通过求取各个频率下的波阻抗和传播函数的幅频响应来直接估计公式 6 中的零点和极点, 从而得到波阻抗和传播函数的时域表达式 (以传播函数为例, 式中 T_{\min} 表示行波传播的最短时间)。

$$A(s) \approx e^{-sT_{\min}} \sum_{k=1}^N \frac{A_k}{s-p_k} \quad (7a)$$

$$a(t) \approx \sum_k A_k e^{p_k(t-T_{\min})} \quad (7b)$$

这个模型在现在依然是分析输电线路故障暂态过程和电磁暂态计算的基础。随后, 为了更加进一步的精确模拟输电线路的暂态过程, 考虑线路的分布参数不仅是频率相关的, 文献[9]利用 Marti 频率相关分析方法, 对具有指数分布规律的线路进行了分析, 由于线路阻抗不仅与频率有关而且还是距离 x 的函数, 因此在频域内的分析结果就已经非常复杂。当进一步考虑线路具有非线性边界和非线性的参数时, 利用上述基于 Laplace 变换的特征法

(Characteristic Method) 没有办法对线路进行求解^[10~12]。另外, 当考虑线路的频率相关模型时, 特征法给出的是行波在频域内的传输关系, 无法分析时域内的特征, 而行波的波形恰恰是随着时间的变化其频率响应也是变化的。基于此, 文献[13]提出利用网格法基于线路频率相关模型的时频分析方法, 然而这种方法只适合对线路故障暂态作一些定性的分析。

1.3 电磁暂态的离散分析和计算方法

由于传统的基于 Laplace 变换的特征法分析和计算输电线路的局限性: 不仅计算复杂, 需要估计波阻抗和传播函数的零极点, 在时域内进行多次卷积计算, 而且不适合对线路的暂态过程进行有效的分析, 因为线路的暂态过程是随着时间变化的 (行波在不断的折反射)。迫切需要建立新的输电线路的分析和计算模型。

考虑到输电线路的传递特性, 文献[10~12]建立了输电线路时域内的递推模型, 可以对非线性边界条件下的输电线路进行数字计算, 文献[14,15]提出将线路进行分段, 也找出线路各个小段之间的递归关系, 提出了 Pade 矩阵拟合法分析输电线路 MPA (Matrix Pade Approximation)。文献[16]对传统的特征法和分段拟合法进行了分析, 认为 MPA 分析法虽然计算比较简单, 但只适合稍短的线路。文献[17~19]提出基于分段线路的 MPA 方法, 构造出基于网格结构的输电线路递推算法, 这个方法相比较传统的特征法具有计算简单的特点, 然而无法对线路进行故障分析。文献[20,21]提出了时域内有限差分法 (Finite Difference in Time Domain), 文献[22~24]提出利用有限元法分析输电线路的暂态过程, 将输电线路将线路划分为 N 个有限元的小段, 每个有限元上的电气量只是时间 t 的函数, 然后带入电报方程中将二元偏微分方程转化为一元关于时间的微分方程, 最终得到每个有限元之间的递推计算关系。文献[25~27]利用小波变换理论建立了每个小波系数上的递推关系。

上述这些新的求解线路方程的方法为研究输电线路的暂态模型开拓了思路, 然而上述方法都仅限于对线路的递推求解, 广泛应用于电磁兼容 (EMI) 电子电路、电磁场和电磁波、以及电路与系统等专业中, 不适合电力系统输电线路暂态过程计算和分析。小波分析和算子理论在输电线路暂态分析和计算上的应用为解决输电线路的模型提供了一个新的思路。

2 基于投影算子理论的输电线路暂态分析与计算新思路

根据投影算子理论、函数逼近理论以及多分辨率分析理论^[28-30], 首先利用逼近算子 P_j 将线路上任意点 x 处的电压和电流在某个 2^j 分辨率的采样空间中进行逼近:

$$f_j(t) = P_j f(t) \quad (8)$$

当 $j \rightarrow \infty$ 时, $\|f(t) - f_j(t)\| \rightarrow 0$, 即用 2^j 分辨率下的采样空间 $V_j \subset L^2(\mathbf{R})$ 来逼近整个平方可积空间 $L^2(\mathbf{R})$ 。假设 $\{\phi_{j,k}(t) = \phi(2^j t - k)\}$ 是采样空间 V_j 的一组正交基, 那么有:

$$f_j(t) = \sum_k C_{j,k} \phi_{j,k}(t) \quad (9)$$

其中的系数向量 $C_j = P_j f_j(t)$, 即逼近算子其实就是 $L^2(\mathbf{R})$ 中的信号在子空间 V_j 中的投影算子。由此, 我们可以将线路上任意点 x 处的电压和电流近似表示为:

$$u(x, t) \approx u_j(x, t) = \sum_k U_{j,k}(x) \phi_{j,k}(t) \quad (10a)$$

$$i(x, t) \approx i_j(x, t) = \sum_k I_{j,k}(x) \phi_{j,k}(t) \quad (10b)$$

其中: 系数 $U_j(x) = [U_{j,k}(x)]$ 是线路上 x 点处的电压逼近函数波形 $u_j(x, t)$ 在空间 V_j 上的投影, $I_j(x) = [I_{j,k}(x)]$ 是线路上 x 点处的电流逼近波形在空间 V_j 上的投影。这样就得到了电报方程在 V_j 中的逼近方程:

$$\frac{\partial}{\partial x} P_j u(x, t) = R_0 P_j i(x, t) + L_0 \frac{\partial}{\partial t} P_j i(x, t) \quad (11a)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} P_j i(x, t) = G_0 P_j u(x, t) + C_0 P_j \frac{\partial}{\partial t} u(x, t) \quad (11b)$$

将方程 11 在正交基 $\{\phi_{j,k}(t) = \phi(2^j t - k)\}$ 上作一次投影变换, 就可以得到只关于距离 x 的系数方程:

$$-\frac{dU_j(x)}{dx} = (R_0 E + L_0 A_j) I_j(x) \quad (12a)$$

$$-\frac{dI_j(x)}{dx} = (G_0 E + C_0 A_j) U_j(x) \quad (12b)$$

其中: E 为单位矩阵, $A_j = P_j \frac{\partial}{\partial t} P_j$ 是关于时间 t 的微分算子在空间 V_j 中的投影, 这个矩阵的元素只与该空间中的基函数 $\phi_{j,k}(t)$ 有关, 而与电

压和电流的投影无关。

矩阵 A_j 总可以分解为 $Q^{-1} A_j Q = \Lambda_j$, $\Lambda_j = \text{diag}\{\lambda_{j,k}\}$ 为对角阵, 这样, 就可以将方程 12 进行分解, 由此可以得到一个只关于距离 x 的方程:

$$-\frac{dU_{j,k}^{(m)}(x)}{dx} = (R_0 + L_0 \lambda_{j,k}) I_{j,k}^{(m)}(x) \quad (13a)$$

$$-\frac{dI_{j,k}^{(m)}(x)}{dx} = (G_0 + C_0 \lambda_{j,k}) U_{j,k}^{(m)}(x) \quad (13b)$$

其中: $U_j^{(m)} = Q^{-1} U_j$, $I_j^{(m)} = Q^{-1} I_j$ 。

这样, 投影变换算子将关于时间 t 和距离 x 的二元偏微分方程组转化为只关于距离 x 的微分方程组, 而且其中的参数为常数。

根据线路在边界点的电压电流波形的投影 $U_{j,k}^{(m)}(0)$ 和 $I_{j,k}^{(m)}(0)$, 就可以解出线路上各点的电压和电流的投影:

$$U_{j,k}^{(m)}(x) = U_{j,k}^{(m)}(0) \text{ch}(\gamma_{j,k} l) - Z_{j,k} I_{j,k}^{(m)} \text{sh}(\gamma_{j,k} l) \quad (14a)$$

$$I_{j,k}^{(m)}(x) = I_{j,k}^{(m)}(0) \text{sh}(\gamma_{j,k} l) / Z_{j,k} - I_{j,k}^{(m)} \text{ch}(\gamma_{j,k} l) \quad (14b)$$

其中: $U_{j,k}^{(m)}$ 、 $I_{j,k}^{(m)}$ 分别为电压电流在二进尺度空间 V_j 中的投影, 经过解耦变换后的值:

$$\gamma_{j,k} = \sqrt{(R_0 + \lambda_{j,k} L_0)(G_0 + \lambda_{j,k} C_0)};$$

$$Z_{j,k} = \sqrt{(R_0 + \lambda_{j,k} L_0) / (G_0 + \lambda_{j,k} C_0)};$$

然后将投影值重构成线路上 x 点处的电压电流波形。

3 基于投影算子理论的输电线路暂态分析的展望

综上所述, 依据该原理, 按照从均匀分布参数的线路—频率相关参数线路—不均匀线路, 从单相输电线路分析—多导线输电线路分析, 依次从简单到复杂, 研究其基于小波和算子理论的暂态过程和计算方法。由此, 提出以下四点尚待解决的问题。

1) 基于投影算子理论, 建立单相输电线路的数值计算模型。

通过深入研究函数逼近、投影算子以及小波与算子理论, 寻找一组计算简便、精确度高的尺度函数基, 利用投影算子求取投影向量方程中的常数矩

阵 A_j (参见公式 12), 建立单根输电线路的新的数值计算模型。这个尺度基函数必须满足一阶导数连续, 且其导函数也能构成是 $L^2(R)$ 空间的一组基。

2) 利用算子理论, 按照上述思路研究具有频率相关的分布参数的线路的投影算子解。频率相关参数的微分方程与传统的电报方程具有一些差异, 主要表现在电感和电容参数为时间 t 的函数, 而且分布参数与电压电流之间并非相乘而是卷积的关系。因此必须研究尺度函数基 $\phi_k(t)$ 与 $R(t)*\phi_k(t)$ 以及 $L(t)*[d\phi/dt]$ 之间的关系, 从理论上讲, 由于 $\{\phi_k(t)\}$ 为 $L^2(R)$ 空间的一组基, 因此后者一定可以用 $\phi_k(t)$ 线性的表示。

3) 研究线路不均匀分布参数的电磁暂态解。不均匀分布参数 (Non-uniform) 线路的分布参数是距离 x 的函数, 如果再考虑频率相关因素的话, 则其参数也是时间和距离的函数。

4) 研究基于上述输电线路的投影算子模型的基础上, 研究多导线的电磁暂态分析方法, 多导线的线路方程本身就是一个向量方程, 因此除了上述过程外, 还需要对原方程进行解耦。

参考文献

- [1] 张保会. 加强继电保护与紧急控制系统的研究提高互联电网安全防御能力 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7):1-6.
ZHANG Bao-hui. Strengthen the Protection Relay and Urgency Control Systems to Improve the Capability of Security in the Interconnected Power Network [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7):1-6.
- [2] 张保会. 电网继电保护与实时安全性控制面临的问题与需要开展的研究 [J]. 电力自动化设备, 2004, 24(7):1-6.
ZHANG Bao-hui. Problems on Protection Relay and Urgency Control System in Interconnected Power Network in China and Studies Needed [J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(7):1-6.
- [3] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术 [J]. 西安: 西安交通大学出版社, 1995.
GE Yao-zhong. New Principle of Protective Relaying and Fault Location Techniques [J]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1995.
- [4] Dommel H W. Digital Computer Solution of Electro-Magnetic Transients in Single End Multi-phase Networks [J]. IEEE Trans on PAS, 1969, 88(4): 388-399.
- [5] Chang F Y. Transient Simulation of Non-uniform Coupled Lossy Transmission Line Characterized with Frequency Dependant Parameters, Part I: Waveform Relaxation Anaysis [J]. IEEE Trans on Circuit and Systems, 1992, 39:585-603.
- [6] LIN Shen, Kuh E S. Transient Simulation of Lossy Interconnections Based on the Recursive Convolution Formulation [J]. IEEE Trans on Circuits and Systems-I: Fundamental and Applications, 1992, 39(11):879-892.
- [7] Marti J R. Accurate Modeling of Frequency Dependent Transmission Lines in Electromagnetic Transient Simulation [J]. IEEE Trans on Power Apparatus Syst, 1982, 101:147-155.
- [8] Marti L. Simulation of Transients in Under-ground Cables with Frequency Dependant Modal Transformation Matrix [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1988, 3(3): 1099-1110.
- [9] Nguyen H V, Dommel H W, Marti J R. Modelling of Single Phase Non-uniform Transmission Lines in Electro-Magnetic Transient Simulations [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12(2):916-921.
- [10] Griffith J R, Nakhla M. Time-domain Analysis of Lossy Coupled Transmission Lines [J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 1990, 38:1480-1487.
- [11] Maio I, Pignari S, Canavero F. Influence of the Line Characterization on the Transient Analysis of Nonlinearly Loaded Lossy Transmission Lines [J]. IEEE Trans on PAS, 1994, 41(3):197-209.
- [12] Kyung S, Jose E. Transient Analysis of Coupled, Tapered Transmission Lines with Arbitrary Nonlinear Terminations [J]. IEEE Trans on Microwave Theory and Techniques, 1993, 41(2):268-273.
- [13] 哈恒旭. 超高压输电线路边界保护的研究 (博士学位论文) [D]. 西安: 西安交通大学, 2002.
HA Heng-xu. Study on Boundary Protection for EHV Transmission Lines, Doctoral Dissertation [D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2002.
- [14] Dounavis A, Li X, Nakhla M S, et al. Passive Closed-form Transmission-line Model for General-purpose Circuit Simulators [J]. IEEE Trans on Microwave Theory Tech, 1999, 47:2450-2459.
- [15] Dounavis A, Achar R, Nakhla M S. Efficient Passive Circuit Models for Distributed Networks with Frequency-dependent Parameters [J]. IEEE Trans on Adv Packag, 2000, 22:382-392.
- [16] Elfadel I M, HUANG Hao-ming, Al E, et al. A Comparative Study of Two Transient Analysis Algorithms for Lossy Transmission Lines with Frequency-Dependent Data [J]. IEEE Trans Adv Packing, 2002, 25(2):143-153.
- [17] Faccio M, Ferri H, Amico A D. The DFF and DFFz

- Triangles and Their Mathematical Properties[J]. *Applicat Fibonacci Numbers*, 1990,5:199-206.
- [18] Ferri G, Faccio M, Amico A D. A New Fast Method for Ladder Networks Characterization[J]. *IEEE Trans on Circuits Syst I*, 1991,38:1377-1382.
- [19] Antonini G. A New Methodology for the Transient Analysis of Lossy and Dispersive Multiconductor Transmission Lines[J]. *IEEE Trans on Microwave Theory and Techniques*, 2004,52(9):2227-2239.
- [20] LU Tie-bing, CUI Xiang, LI Lin. Transient Analysis of Aerial Multi-conductor Transmission Lines with Branch[J]. *IEEE Trans on Magn*, 2001,37(5):3298-3302.
- [21] LU Tie-bing, CUI Xiang, LI Lin. Time-domain Analysis of Transient Electromagnetic Field Generated by Aerial Busbars above Lossy Soil[J]. *IEEE Trans on Magn*, 2002,38(2):773-776.
- [22] Lee S Y, Konrad A, Saldanha R. Lossy Transmission Line Transient Analysis by the Finite Element Method[J]. *IEEE Trans on Magnetics*, 1993,29(2):1730-1732.
- [23] Miranda G C D, Emilio A, Araujo A Dm, et al. Finite Element Method for Transmission Line Corona Effect Simulation Using the EMTP[J]. *Electric Machines and Power Systems*, 1999,27(7):781-794.
- [24] Dao J, Jin J A. General Approach for the Stability Analysis of the Time Domain Finite Element Method for Electromagnetic Simulations[J]. *IEEE Trans on Ant Pro*, 2002,50(11):1624-1632.
- [25] Raugi M. Wavelet Transform Solution of Multi-Conductor Transmission Line Transients[J]. *IEEE Trans on Magnetics*, 1999,35(3): 1554-1557.
- [26] Grivet-Talocia S, Canavero F. Wavelet-based Adaptive Solution for the Nonuniform Multiconductor Transmission Lines[J]. *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, 1998,8:287-289.
- [27] Raugi B M. Transient Numerical Solution of Nonuniform MTL Equations with Nonlinear Loads by Wavelet Expansion in Time or Space Domain[J]. *IEEE Trans on CAS*, 2000,47(8):1178-1190.
- [28] Chui C K. Wavelets: A Tutorial in Theory and Applications[M]. New York, Academic Press, 1992.
- [29] Daubechies I. The Wavelet Transform, Time-frequency Localization and Signal Analysis[J]. *IEEE Trans on Information Theory*, 1990, 36(5):961-1005.
- [30] Mallat S, Zhong S. Characterization of Signals from Multi-Scale Edge[J]. *IEEE Trans on PAMI*, 1992,14(7): 710-732.

收稿日期: 2006-07-01; 修回日期: 2006-10-18

作者简介:

王大鹏(1970-), 女, 副教授, 硕士, 研究方向为电力系统继电保护;

魏佩瑜(1960-), 女, 副教授, 学士, 研究方向为电工理论与新技术;

王婧(1983-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护;

哈恒旭(1972-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail:hxharr@163.com

(上接第4页 continued from page 4)

- [13] 石敏, 吴正国, 尹为民. 基于多信号分类法和普罗尼法的间谐波参数估计[J]. *电网技术*, 2005, 29(15): 81-84.
SHI Min, WU Zheng-guo, YIN Wei-min. Inter-harmonic Parameter Estimation Based on Multi-signal Classification and Prony Method[J]. *Power System Technology*, 2005,29(15):81-84.
- [14] 李一泉, 何奔腾. 基于 Prony 算法的电容式电压互感器暂态基波识别[J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(14): 30-34.
LI Yi-quan, HE Ben-teng. Identification of Fundamental Wave in CTV Transient Process Based on Expanded Prony Algorithm[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(14):30-34.
- [15] Pierre D A, Trudnowski D J, Hauer J F. Identifying Linear Reduced-order Models for Systems with Arbitrary Initial Conditions Using Prony Signal Analysis[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1992, 37(6): 831-835.
- [16] 张贤达. 现代信号处理(第二版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
ZHANG Xian-da. *Modern Singnal Processing, Second Edition*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.

收稿日期: 2006-11-07

作者简介:

王雪(1978-), 男, 硕士, 讲师, 从事电力系统继电保护研究。E-mail:wangxuedl@126.com