

基于频率相关模型的输电线行波传播数字算法

何柏娜^{1,2}, 赵云伟³, 张新慧¹, 林鹤云², 哈恒旭¹

(1. 山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博 255049;

2. 东南大学电气学院, 南京 210096; 3. 山东工业职业学院电气工程系, 山东 淄博 256414)

摘要: 笔者利用投影变换、微分函数的代数逼近建立频率相关参数的离散时间数字方程, 将其进行 z 变换, 得到 z 域内的行波传输方程。利用Poisson求和公式, 得到传播函数和波阻抗的递归离散序列, 考虑传播函数的频率响应相当于IIR低通滤波器, 采用Prony算法将其参数拟合为零极点形式, 减少离散序列的个数, 最终将行波传播计算转化为系数很少的递归计算。在适合现有保护装置能够实现的较低采样频率下, 基于频率相关模型的基础上实现利用首端行波计算对侧行波的快速算法。通过PSCAD仿真表明, 该算法具有较高的准确性和精确性, 取得了很好地效果。

关键词: 传播函数; 频率相关模型; 行波传播

中图分类号: TM726

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2014)09-0023-06

Novel Digital Algorithm of Traveling Wave Propagation for Transmission Lines Based on Frequency-dependent Model

HE Baina^{1,2}, ZHAO Yunwei³, ZHANG Xinhui¹, LIN Heyun², HA Hengxu¹

(1. College of Electric and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Shandong Zibo 255049, China;

2. College of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

3. Department of Electric Engineering, Shandong Industry Vocational College, Shandong Zibo 256414, China)

Abstract: A discrete-time numerical equation of frequency-dependent parameters is established by adopting projection transform and algebraic approximation of differential function. And z transform is used to convert the numerical equation into a traveling wave propagation equation in z domain. The recursive discrete sequences of propagation function and wave impedance are obtained through Poisson summation formula. Considering that the propagation function's frequency response is equivalent to a IIR low-pass filter, the parameters are fitted as the form of a zero pole via Prony algorithm to decrease the number of discrete sequences, and eventually to convert the calculation of traveling wave propagation into the recursive calculation with less coefficients. In the condition of lower sampling frequency suitable for the existing protection devices, the fast algorithm for calculating contralateral traveling wave by making use of head traveling wave is realized on the basis of the frequency-dependent model. Simulation with PSCAD show that the proposed algorithm is more accurate and precise.

Key words: propagation function; frequency-dependent model; traveling wave propagation

0 引言

收稿日期: 2014-04-09; 修回日期: 2014-04-27

20世纪80年代初, MARII J 提出频率相关参数

基金项目: 山东省高等学校科技计划项目(J14LN27); 山东理工大学科技计划资助项目(103121和103233); 博士科研启动基金(411019)。

Project Supported by Province Science and Technology Plan Project (J14LN27), Shandong University of Technology Science and Technology Funded Project (103121 and 103233), Doctoral Scientific Research Fund (411019).

的贝瑞隆模型,其中参数 R 、 L 、 C 都是频率 f 的函数^[1-3],并且所有参数,包括线路损耗,都是沿线路连续分布的^[4-7]。因此,在线路保护中频率相关模型相对比较准确。笔者在 Bergeron 等值计算模型的基础上进行改进,实现频率相关参数的等值计算。Bergeron 等值计算模型见图 1。

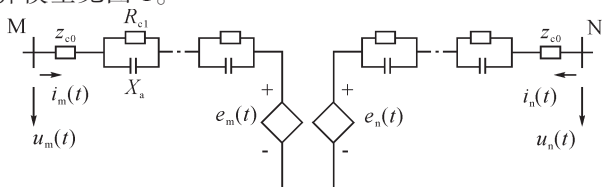


图 1 Bergeron 等值计算模型

Fig. 1 Bergeron equivalent calculation model

根据行波的传输理论,建立行波传播方程

$$\begin{cases} e_m(t) = a_1(t) \times b_n(t) = \int_0^t a_1(t-\tau) b_n(\tau) d\tau \\ e_n(t) = a_1(t) \times f_m(t) = \int_0^t a_1(t-\tau) f_m(\tau) d\tau \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中,

$$\begin{cases} b_n(t) = u_n(t) + \int_0^t Z_c(t-\tau) i_n(\tau) d\tau \\ f_m(t) = u_m(t) + \int_0^t Z_c(t-\tau) i_m(\tau) d\tau \end{cases} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)可看出,计算量比较大,且存在大量的卷积运算,每一时间间隔的卷积需要大量的历史数据,这增加了非线性电路的复杂性,不适合在线快速计算。且 MARTI J 频率分析方法只能在频域内进行分析,而无法分析时域内的特征^[8-10]。

如果能得到行波传输方程中各个不同频率下对应的不同时刻参数变化,即得到波阻抗和传播函数在时域内离散的表达式,就可以实现精确模型下的准确计算,克服以上缺点^[11-14]。

笔者提出频率相关模型的输电线路暂态计算方法。首先利用投影变换理论建立频率相关参数数字计算模型,利用 Poisson 求和公式,得到传播函数和波阻抗的递归离散序列;并利用 Prony 算法拟合出传播函数和波阻抗的极点和系数,减少离散序列的个数,将行波传播计算转化为系数个数很少的递归计算,实现了利用首端行波计算对侧行波的快速算法,大量的 PSCAD 仿真验证表明,该算法在现有保护装置能够实现的较低采样频率下,具有较高的准确性和精确性。

1 基本原理

1.1 频率相关参数的输电线路模型

线路参数考虑频率特性时,对于长度为 L 的单相输电线路 MN,在线路任意位置 x 处的频域表达式为

$$\begin{cases} -\frac{dU(x, j\omega)}{dx} = Z(j\omega)I(x, j\omega) \\ -\frac{dI(x, j\omega)}{dx} = Y(j\omega)U(x, j\omega) \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中: $Z(j\omega)$ 、 $Y(j\omega)$ 分别为每公里长的阻抗和导纳。根据卡松公式可表示为

$$\begin{cases} Z(j\omega) = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \left[\ln \frac{D}{d} + \frac{0.3565E_c + E_c \text{Marccoth}(0.777rM)}{\pi r^2} + \frac{E_c}{2\pi r} \right] \\ Y(j\omega) = \frac{j\omega 2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{D}{d}} \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中: μ_0 为空气磁导率; D 为导线高度; d 为导线直径; r 为导线半径; $E_c = R_{DC} L/A$, A 为导线截面积; $M = \sqrt{j\omega\mu_0/E_c}$; ϵ_0 为空气的介电常数。

行波两侧的传播关系为

$$\begin{cases} F_N(j\omega) = A_L(j\omega)F_M(j\omega) \\ B_M(j\omega) = A_L(j\omega)B_N(j\omega) \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中: $F=U+Z_c I$ 为前行波; $B=U-Z_c I$ 为反行波; $A_L(j\omega) = \exp[-\gamma(j\omega)L]$ 为线路的传播函数, $\gamma(j\omega) = \sqrt{Z(j\omega)Y(j\omega)}$ 为线路传播参数, $Z_c(j\omega) = \sqrt{Z(j\omega)/Y(j\omega)}$ 为线路波阻抗。

1.2 Poisson 求和公式

将式(5)反变换到时域就可进行数字计算,关键在于传播函数 $A_L(j\omega)$ 和波阻抗 $Z_c(j\omega)$ 的反变换^[15-17]。根据 Shannon 采样定理,离散系统的频谱是其相应的连续系统频谱的周期延拓。当采样频率 $N_s=1/T_s$ 时

$$A_L(z) = \sum_k A_L(j\omega + 2\pi N_s k) \quad (6)$$

根据 Poisson 求和公式

$$\sum_k f(x+2\pi k a) = \frac{1}{2\pi a} \sum_k \hat{f}\left(\frac{k}{a}\right) e^{-j\pi \frac{k^2}{a}} \quad (7)$$

$$\text{式(7)中, } \hat{f}\left(\frac{k}{a}\right) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-j\pi k x/a} dx.$$

利用 Poisson 求和公式将传播函数变为

$$A_L(z) = \sum_k a_L(k) e^{-j\pi k L/a} = \sum_k a_L(k) z^{-k} \quad (8)$$

式(8)中: $a_L(k)$ 是传播函数的单位脉冲响应,即 $A_L(z)$ 的反变换。波阻抗 Z_c 用同样的方法处理。

1.3 传播函数和波阻抗的数字模型

利用 Poisson 求和公式求得传播函数和波阻抗的离散表达式。将式(8)表示为有理多项式的形式

$$A_L(z) = Z^{-N_{im}} \frac{\beta_0 + \beta_1 z^{-1} + \dots + \beta_M z^{-M}}{1 + \alpha_1 z^{-1} + \dots + \alpha_N z^{-N}} = Z^{-N_{im}} A_{10}(z) \quad (9)$$

式(9)中: $N_{\min}$ 为延迟点数, 表示传播速度最快的频率分量传播需要的最短时间。可事先估算延迟点数, 用光速来估计

$$N_{\min} = \text{floor}[L/(cT_s)]。 \quad (10)$$

函数 floor 表示向下取整数, 为了不影响精确度将非整数部分可以合并并在 A_{l0} 中

$$A_{l0}(j\omega) = A_L(j\omega) \exp(j\omega N_{\min} T_s)。 \quad (11)$$

这样只需得到 A_{l0} 的离散表达式, 再将延迟时间合并便可得到 a_{l0} 。

当采样间隔为 T_s 时, 根据采样频率 $N_s = 1/T$ 来确定频率间隔: $\Delta f = 0.5N_s/N$, N 为频率点的个数。利用 Poisson 求和公式, 可计算出传播函数和波阻抗离散表达式

$$\begin{cases} a_{l0}(n) = \frac{1}{2\pi N_s} \sum_{k=0}^N A_{l0}(k\Delta f) \exp(j2\pi k\Delta f \frac{n}{N_s}) \Delta f \\ z_c(n) = \frac{1}{2\pi N_s} \sum_{k=0}^N Z_c(k\Delta f) \exp(j2\pi k\Delta f \frac{n}{N_s}) \Delta f \end{cases}。 \quad (12)$$

然而由 Poisson 求和公式得到的传播函数和波阻抗系数的离散序列比较长, 在分析行波的传播过程中计算量比较大^[18-22], 利用 Prony 算法将传播函数拟合为极点和零点形式, 有利于行波传播的快速计算。

1.4 Prony 算法对传播函数的拟合

利用 Prony 算法可以将较长的 $a_{l0}(n)$ 拟合为零极点形式。其中

$$a_{l0}(n) = \sum_k b_k e^{p_k n T_s} = \sum_k b_k z_k^n。 \quad (13)$$

将式(13)进行 z 变换后

$$A_{l0}(z) = \sum_{n=0}^{\infty} a_{l0}(n) z^{-n} = \sum_k [\sum_{n=0}^{\infty} b_k z_k^n z^{-n}] = \sum_k \frac{b_k}{1 - z_k z^{-1}}。 \quad (14)$$

利用 Prony 算法拟合传播函数的系数, 步骤如下:

1) 利用齐次差分方程求解极点

$$\begin{bmatrix} a_{l0}(n) \\ a_{l0}(n-1) \\ \vdots \\ a_{l0}(n-p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_{l0}(n-1) & -a_{l0}(n-2) & \cdots & -a_{l0}(n-N) \\ -a_{l0}(n-2) & -a_{l0}(n-3) & \cdots & -a_{l0}(n-1-N) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -a_{l0}(n-p-1) & -a_{l0}(n-p-2) & \cdots & -a_{l0}(n-p-N) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_N \end{bmatrix}。 \quad (15)$$

用矩阵可表示为: $A_{l0} = B\alpha$, 利用最小二乘法求解系数 α

$$\alpha = (B^T B)^{-1} B^T A_{l0}。 \quad (16)$$

2) 利用有理多项式系数 α 得到极点 z_k 的值

$$z_k = \text{roots}([1, \alpha_1, \cdots, \alpha_N])。 \quad (17)$$

3) 利用采样点和求取的极点, 建立复系数 b_k 的方程

$$\begin{bmatrix} a_{l0}(n) \\ a_{l0}(n-1) \\ \vdots \\ a_{l0}(n-p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1^n & z_2^n & \cdots & z_N^n \\ z_1^{n-1} & z_2^{n-1} & \cdots & z_N^{n-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_1^{n-p} & z_2^{n-p} & \cdots & z_N^{n-p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_N \end{bmatrix}。 \quad (18)$$

将其用矩阵形式表示为

$$A_{l0} = Zb。 \quad (19)$$

利用最小二乘法求解, 可以解出系数 b

$$b = (Z^H Z)^{-1} Z^H A_{l0}。 \quad (20)$$

得到 z_k 、 b_k 后, 就会得到传播函数 $A_L(z)$

$$A_L(z) = Z^{-N_{\min}} \sum_{k=1}^N \frac{b_k}{1 - z_k z^{-1}} = Z^{-N_{\min}} \frac{\beta_0 + \beta_1 z^{-1} + \cdots + \beta_M z^{-M}}{1 - \alpha_1 z^{-1} + \cdots + \alpha_N z^{-N}}。 \quad (21)$$

由此可知, 该算法更加完善、精确。

1.5 计算方法流程图

通过该方法得到传播函数和波阻抗的离散表达式。下面以传播函数为例说明具体实施过程, 见图 2。

1) 设定一个比较小的采样间隔 $T_{s\min}$, 对于不同采样频率满足 $T_s = K_f T_{s\min}$, 其中 K_f 为倍数。采样频率 $N_s = 1/T_{s\min}$, 设定频率间隔 $\Delta f = 0.5N_s/N$, N 为频率点的个数。

2) 已知传播函数 A_L 在频域内的表达式, 根据线路长度和采样频率得到延迟的点数 $N_{\min}$, 满足 $T_{\min} = T_{s\min} N_{\min}$ 。

3) 根据 Poisson 求和公式和 Prony 算法将频域内的表达式 A_{l0} 转化到时域 a_{l0} 表示。

4) 通过仿真验证该算法的准确性。

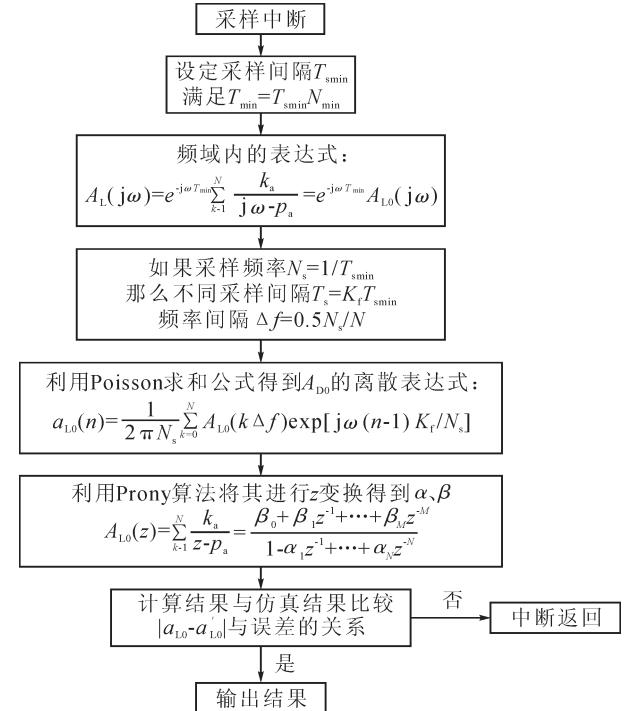


图 2 传播函数计算流程图

Fig. 2 Spread function calculation flow chart

1.6 传播函数的验证

采用频率相关模型,对该方法得到的传播函数进行验证。当采样间隔 $T_s=5 \times 10^{-4}$ ms,计算得到的传播函数和波阻抗系数见图3,计算结果与仿真结果对比见图4。

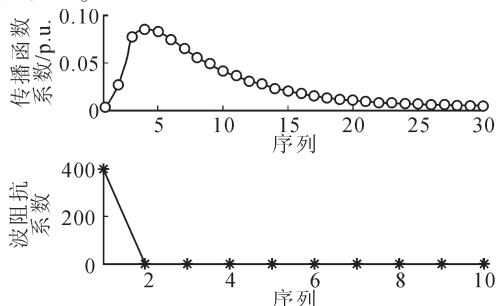


图3 传播函数和波阻抗系数

Fig. 3 Spread function and wave impedance coefficient

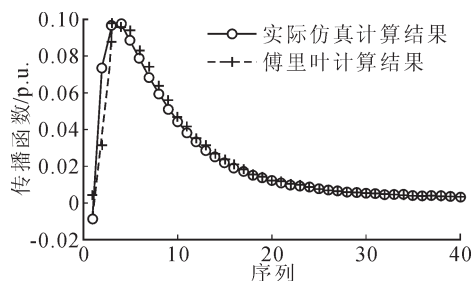


图4 传播函数的离散序列与仿真计算结果的比较

Fig. 4 Compared with spread function discrete sequence and results of the simulation calculation

从图4可以看出,频率相关模型的传播系数非零元素长达40点,当线路较长,采样频率较高时,传播函数延迟时间加长,导致传播函数的系数加大,计算量比较大。为了合理限制序列长度,利用Prony算法得到传播函数系数,仿真结果见图5。

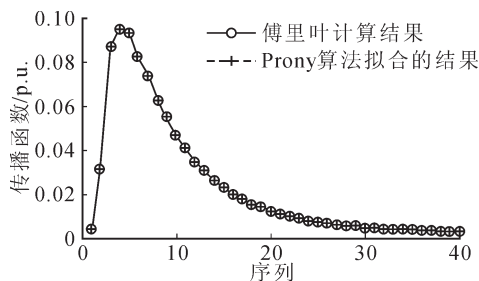


图5 Prony算法和傅里叶计算结果对比图

Fig. 5 Prony algorithm and fourier calculation results contrast figure

由图5看出Prony算法拟合比较准确,缩短了离散序列的长度,大大减少计算量,精确度比较高。

2 行波传播的实现

2.1 行波传播的数字计算

假设线路始端M侧 $x=0$ 处,可根据测得的电

压、电流计算出线路前行波、反行波(文中以电流行波为例,电压行波不再赘述)。

$$\begin{cases} f_m(k) = i_m(k) + Y_c * u_m(k) \\ b_m(k) = i_m(k) - Y_c * u_m(k) \end{cases} \quad (22)$$

式(22)中: Y_c 为线路的波导纳系数,符号“*”表示离散的卷积。

因此,差动方程的数字表达式为

$$\begin{cases} e_n(k) = f_m(k) * a_l(k) \\ e_m(k) = b_n(k) * a_l(k) \end{cases} \quad (23)$$

根据式(21)得到 $\{\alpha_k, \beta_k\}$,可在线快速计算时域内N侧的前行波和M侧的反行波。

$$\begin{cases} e_n(k) = \sum_{l=0}^M \beta_l f_m(k-l-N_{min}) - \sum_{l=1}^N \alpha_l e_n(k-l) \\ e_m(k) = \sum_{l=0}^M \beta_l b_n(k-l-N_{min}) - \sum_{l=1}^N \alpha_l e_m(k-l) \end{cases} \quad (24)$$

2.2 行波传播的流程图

根据Poisson求和公式和Prony算法得到传播函数,由行波传输理论构造保护判据实现保护方案,其具体的实施过程见图6。

- 1)首先得到离散的传播函数系数 α, β ;
- 2)测量一端的电压、电流,构造前行电流行波和反行电流行波;
- 3)由行波的传输关系,得到对侧的行波的数字表达式;
- 4)利用该方法计算的结果与实际仿真结果进行比较,其验证传播函数的准确性。

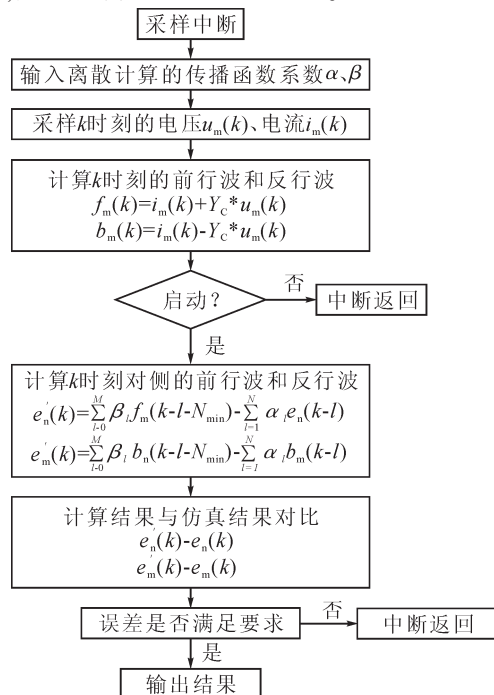


图6 在线快速计算行波传播流程图

Fig. 6 Online fast calculation flow chart of wave propagation

3 PSCAD 仿真验证

图 7 中仿真系统参考山东电网 500 kV 输电系统, 把淄博至邹县线路作为数据验证对象, 线路长度为 328 km, 线路均采用频率相关参数。

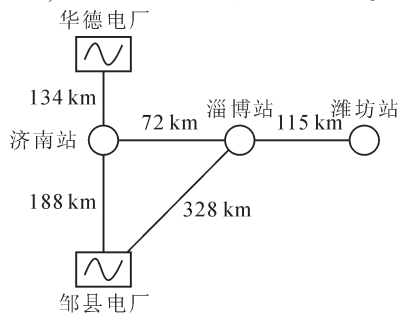
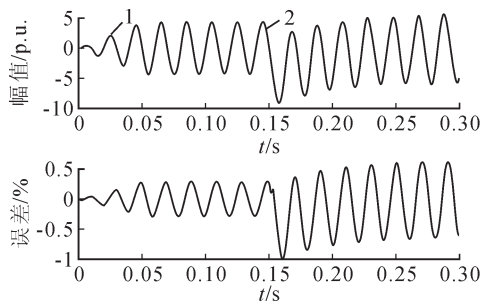


图 7 仿真系统线路模型

Fig. 7 Simulation system model of the line

3.1 仿真结果比较

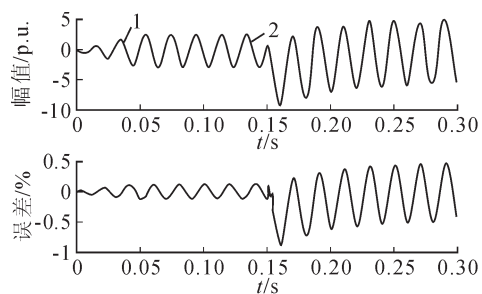
假设在邹县电厂末端发生单相接地故障, 当采样间隔为 $T_s=0.1$ ms 时, 在 0.15 s 时刻 A 相发生金属性接地故障。利用新算法得到淄博站的反行波和邹县末端的前行波, 其结果与 PSCAD 中的波形进行比较, 见图 8、9。



1—实际仿真计算结果; 2—该方法计算结果。

图 8 邹县电厂末端计算的前行波

Fig. 8 Forward wave at the end of Zou Power



1—实际仿真计算结果; 2—该方法计算结果。

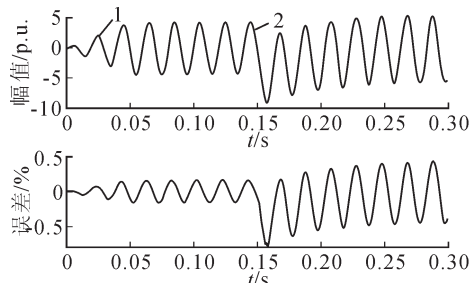
图 9 淄博电厂端计算的行波

Fig. 9 Traveling wave at Zibo Power

从图 8、9 可以看出, 计算仿真结果与实际仿真结果基本吻合, 最大误差不超过 1.04%, 说明文中采用的新方法计算结果比较准确。该方法计算量比较小, 仅有 10 次加和乘。

3.2 不同采样频率的结果

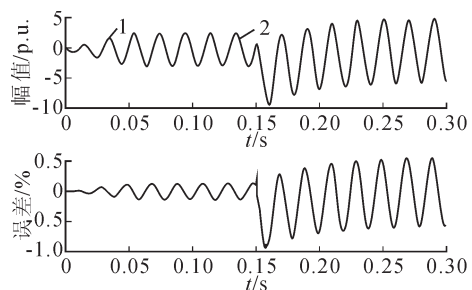
采样间隔为 0.01 ms, 即取 2 000 个采样点, 计算出的行波见图 10、11。



1—实际仿真计算结果; 2—该方法计算结果。

图 10 采样间隔为 0.01 ms 时的前行波

Fig. 10 Forward wave (csampling interval is 0.01 ms)



1—实际仿真计算结果; 2—该方法计算结果。

图 11 采样间隔为 0.01 ms 时的反行波

Fig. 11 Traveling wave (csampling interval is 0.01 ms)

由仿真结果可知, 新方法最大误差不超过 1%, 说明文中提出的新算法具有较高的精确性和准确性。

不同采样间隔下, 与 PSCAD 仿真比较的最大误差见表 1, 从表 1 可以看出, 采样频率越高其结果越精确。

表 1 不同采样间隔下的仿真误差

Tab. 1 Simulation error under different sampling interval

采样间隔 T_s /ms	前行波误差/%	反行波误差/%
0.20	3.14	2.91
0.10	0.93	1.24
0.05	0.72	0.90
0.01	0.77	0.89

4 结语

笔者提出了一种新的算法, 能够精确地由一端计算到对端行波的传播, 计算量小, 拟合精度比较高。该算法是基于函数空间的投影理论建立频率相关参数的数字模型, 进而建立行波传输方程, 利用 Poisson 求和公式和 Prony 算法得到传播函数和波阻抗的递归离散序列, 利用 $A_L(z)$ 、 $Z_c(z)$ 的 IIR 模型, 建立行波传播的递归运算方法, 通过实际仿真网络

验证,仿真结果表明该算法比较精确,计算量较少。

参考文献:

- [1] 周 淦,卢 毅,李 剑,等. 小波包提取算法和相关分析用于电缆双端行波测距[J]. 高电压技术,2011,37(7): 1695-1699.
ZHOU Quan,LU Yi,LI Jian,et al. Wavelet packet extraction algorithm and correlation analysis for double terminal traveling wave fault location of cable[J]. High Voltage Engineering,2011,37(7):1695-1699.
- [2] 胥 杰,张永健,高 亮,等. 单相自动重合闸故障选相元件及MATLAB 仿真研究[J]. 高压电器,2010,46(9):19-21.
XU Jie,ZHANG Yongjian,GAO Liang,et al. Single-phase automatic reclosing based on fault phase selection and MATLAB simulation[J]. High Voltage Apparatus,2010,46(9):19-21.
- [3] 刘亚东,盛戈峰,王 葵,等. 输电线路分布式综合故障定位方法及其仿真分析[J]. 高电压技术,2011,37(4):923-929.
LIU Yadong,SHENG Gehao,WANG Kui,et al. Method and simulation analysis of comprehensively distributed fault location of transmission line[J]. High Voltage Engineering,2011,37(4):923-929.
- [4] 胥 杰,张永健,孙 嘉,等. 基于模式识别的单端行波测距研究[J]. 高压电器,2012,48(6):28-33.
XU Jie,ZHANG Yongjian,SUN Jia,et al. Single terminal travelling waves location based on pattern recognition[J]. High Voltage Apparatus,2012,48(6):28-33.
- [5] 杜 林,陈宏业,陈伟根,等. 采用双端电压行波法的输电线路故障定位系统设计[J]. 高电压技术,2011,37(2): 304-309.
DU Lin,CHEN Hongye,CHEN Weigen,et al. Transmission line fault location system using two-terminal voltage traveling wave[J]. High Voltage Engineering,2011,37(2): 304-309.
- [6] 王国胜,张声圳. 输电线路防外力破坏监测系统的研究[J]. 陕西电力,2013,41(8):64-67.
WANG Guosheng,ZHANG Shengzhen Research on monitoring system for transmission line to protect against damage by outer forces[J]. Shaanxi Electric Power,2013,41(8):46-67.
- [7] 张 晨,佟继春,宋正瀚. 应用大截面导线的特高压直流输电线路极间距优化研究[J]. 陕西电力,2013,41(6): 26-30.
ZHANG Chen,TONG Jichan,SONG Zhenghan. Study on polarity distance optimization of UHVDC transmission line with large cross-section wire[J]. Shaanxi Electric Power, 2013,41(6):26-30.
- [8] RAWANDUZY K F A. Design of a single-anode MIG for high voltage,sub-centimeter gyrotron traveling wave amplifier[C]//2nd International Conference on Computer Research and Development. Kuala Lumpur:IEEE,2010: 632-636.
- [9] 司马文霞,陈 伟,杜 林,等. 基于输电网中故障行波分布和网络依赖图的故障定位算法[J]. 高压电器,2010, 46(6):45-49.
SIMA Wenxia,CHEN Wei,DU Lin,et al. A fault location method of high voltage grid transmission line based on overvoltage online monitoring signal[J]. High Voltage Apparatus,2010,46(6):45-49.
- [10] MEHDIPOUR M,VAFARIE R H,POURMAND A,et al. A new miniaturized traveling-wave electro-osmotic micro-pump by low velocity of fluid for lab-on-a-chip application [C]//20th Iranian Conference on Electrical Engineering. Tehran: IEEE,2012:223-227.
- [11] 彭向阳,钱冠军,李 鑫,等. 架空输电线路跳闸故障智能诊断[J]. 高电压技术,2012,38(8):1965-1972.
PENG Xiangyang,QIAN Guanjin,LI Xin,et al. Intelligent trip-out fault diagnosis of overhead transmission line[J]. High Voltage Engineering,2012,38(8):1965-1972.
- [12] 孟庆梅,王洪生,韩雨航. 输电线路故障暂态行波分析方法[J]. 东北电力技术,2011,32(6):6-8.
MENG Qingmei,WANG Hongsheng,HAN Yuhang. Analysis methodology of transient traveling wave for transmission lines[J]. Northeast Electric Power Technology,2011,32(6): 6-8.
- [13] RITTERSDORF I M. Effects of random circuit fabrication errors on small signal gain in a traveling wave tube[C]// IEEE 38th International Conference on Plasma Sciences. Chicago:IEEE,2011:1.
- [14] 鲍廷义,汪志成,吴仲朗. 基于小波变换自适应匹配的高速铁路牵引网故障单端行波定位法[J]. 科学技术与工程,2012,12(25):6384-6389.
BAO Tingyi,WANG Zhicheng,WU Zhonglang. Method of high-speed railway traction nets fault single-ended traveling-wave positioning based on wavelet transform adaptive matching[J]. Science Technology and Engineering, 2012,12(25):6384-6389.
- [15] 傅 强. 基于行波的电网故障定位[Z]. 南京:南京大学, 2012.
FU Qiang. The grid's fault location based on the traveling wave[Z]. Nanjing:Nanjing University,2012.
- [16] DOGRU S,SHIN J H,DAGLI N. Electrodes for wide-bandwidth substrate-removed electro-optic modulators[J]. Optics Letters,2013,38(6):914-916.
- [17] 赵东峰. 基于小波变换的输电线路分布式故障测距算法研究[Z]. 山东:山东大学,2011.
ZHAO Dongfeng. Research on distributed fault location method for transmission line based on wavelet transform [Z]. Shandong: Shandong University,2011.
- [18] 邓 丰,曾祥君,陈 楠,等. 自适应网络结构的故障行

(下转第 34 页)

- XU Lixin, WANG Bohan. Parameters calculation of complex damping oscillation signals[J]. Journal of Tsinghua University, 1993, 33(4): 68-73.
- [17] 张少康, 李兴源, 王渝红. Prony算法在电力系统参数辨识中的应用[J]. 电网技术, 2010, 34(7): 21-24.
- ZHANG Shaokang, LI Xingyuan, WANG Yuhong. Application of Prony algorithm in power system parameter identification[J]. Power System Technology, 2010, 34(7): 21-24.
- [18] 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 119-125.
- [19] 吴旭升, 马伟明, 王公宝, 等. 基于小波变换和Prony算法的同步电机参数辨识[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(19): 38-42.
- WU Xusheng, MA Weiming, WANG Gongbao, et al. Parameters calculation of synchronous machine based on the wavelet and the Prony method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(19): 38-42.
- [20] 王家林, 夏立, 吴正国, 等. 采用改进Prony算法的电力系统故障暂态信号分析[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(7): 89-93.
- WANG Jialin, XIA Li, WU Zhengguo, et al. Transient signals processing by the improved Prony method in the power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(7): 89-93.
- [21] POLTL A, FROHLICH K. Two new methods for very fast fault type detection by means of parameter fitting and artificial neural networks[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1999, 14(4): 1269-1275.
- [22] 段雄英, 黄智慧, 李蕊, 等. 两种故障电流相控开断电流零点预测算法对比[J]. 高压电器, 2011, 47(1): 5-9.
- DUAN Xiongying, HUANG Zhihui, LI Rui, et al. Comparison between two methods of zero-cross point prediction for controlled fault current interruption[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(1): 5-9.
- 李红蕾(1989—), 女, 硕士研究生, 从事高压开关方面的科研工作。
- 何俊佳(1968—), 男, 博士, 教授, 博士研究生导师, 主要从事电弧电接触、高电压与绝缘技术及脉冲功率技术领域的教学与研究工作。

(上接第28页)

- 波定位方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(19): 66-70.
- DENG Feng, ZENG Xiangjun, CHEN Nan, et al. A network-adapted traveling-wave fault location method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(19): 66-70.
- [19] YU Tian, FAN Chunju, GONG Zhendong. A study on accurate fault location algorithm for parallel transmission line with ateed connection[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2010, 32(6): 697-703.
- [20] 曾祥君, 陈楠, 李泽文, 等. 基于网络的故障行波定位算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(31): 48-53.
- ZENG Xiangjun, CHEN Nan, LI Zewen, et al. Network-based algorithm for fault location with traveling wave[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2008, 28(31): 48-53.
- [21] 束洪春, 朱盛强, 田鑫萃, 等. ± 800 kV 特高压直流线路故障选极的极波面积比值法[J]. 高电压技术, 2011, 37(4): 888-896.
- SHU Hongchun, ZHU Chengqiang, TIAN Xincui, et al. Polarity wave area ratio method of 800 kV UHVDC transmission line fault line selection[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(4): 888-896.
- [22] SONG H, TEKAMP L, FRANCISCO F, et al. Development of a compact and lightweight S-band traveling-wave tube for microwave power module[C]//2010 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC). [S.l.]: IEEE, 2010: 89-90.
- 何柏娜(1977—), 女, 博士, 讲师, 从事电力系统仿真及高电压绝缘技术方面的教学与科研工作。
- 赵云伟(1981—), 男, 硕士, 讲师, 主要从事机电系统检测、诊断与控制方面的教学与研究工作。