

# 基于投影变换模型的新型暂态差动保护算法

谭雨珍<sup>1</sup>, 哈恒旭<sup>1</sup>, 段宇菁<sup>2</sup>

(1. 山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博 255049; 2. 沂源县供电公司, 山东 淄博 255049)

**摘要:** 根据函数逼近和投影变换理论, 微分函数可视为微分算子的投影与函数自身的卷积, 可以建立输电线路的数字方程; 然后, 通过 $z$ 变换, 得到线路采样数字方程的解及 $z$ 域内的传播函数、波阻抗。同时, 利用零极点估计法, 求解出传播函数和波阻抗的冲击响应。根据区外故障两侧行波满足传播关系, 区内故障两侧传播关系被打破这一特征, 提出了利用线路两端行波进行差动判别区内外故障的方法, 并提出了保护的原理和算法。典型线路的ATP仿真验证了新方法的准确性和正确性。

**关键词:** 输电线路; 投影变换;  $z$ 变换; 差动保护; 传播函数

## A novel transient differential protection based on projection transform model

TAN Yu-zhen<sup>1</sup>, HA Heng-xu<sup>1</sup>, DUAN Yu-jing<sup>2</sup>

(1. School of Electric & Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China;  
2. Yiyuan County Power Supply Company, Zibo 255049, China)

**Abstract:** Based on function approximation and projection transform theorems, the differential function is approximated to convolution of the projection of differential operators and the function itself, subsequently the digital equation of transmission line is established. The  $z$ -transform is employed to obtain the solution of the sampling equation, by which the propagation function and surge impedance in  $z$  domain are obtained. The impulse response of propagation function and surge impedance are solved by the zero-pole estimation method. According to the fact that traveling waves satisfy the propagation relationship in external fault while break it in internal fault, the method for identifying external fault from internal fault by using the traveling waves at both ends of the line is proposed, and the protection principle and algorithm are also provided. The ATP simulations associated to a typical transmission system show that the algorithm is right and accurate.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No.50707002).

**Key words:** transmission line; projection transform;  $z$  transform; differential protection; propagation function

中图分类号: TM773 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)20-0021-07

## 0 引言

电力系统电磁暂态分析是继电保护的理论基础, 在暂态保护、故障分析、电磁计算等方面起着十分重要的作用。传统电力系统电磁暂态分析方法是基于“特征法”的, 即首先在频域内进行Laplace变换, 然后经过Laplace反变换获得其时域解<sup>[1-5]</sup>。然而, “特征法”存在两大缺陷, 其一是计算复杂, 计算中存在大量的卷积积分运算, 同时, 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; 其二是 Laplace

变换是一个纯频域变换, 所得暂态解没有时间分辨, 由于行波在不断地发生折反射, 暂态过程恰恰是随着时间的变化而变化的。

目前, 许多学者提出了新方法来解决上述缺陷, 避免进行时域卷积。文献[6-8]提出了一种基于有限元的输电线路电磁暂态的数字计算方法, 其思路是将线路的距离和时间进行分段, 然后构成每个时刻每一段的递推计算公式, 这样, 电报方程就转换成一维的关于时间 $t$ 的微分矢量方程, 分时分段进行计算。波形松弛法运用快速傅里叶变换(FFT)在时域频域内来回变换来求解电报方程, 这就避免了时域卷积。然而, 当研究快速信号时, 这就需要大量的历史数据来避免混淆效应。近来, 文献[9-11]将小

**基金项目:** 国家自然科学基金资助(50707002); 山东省教育厅科技计划项目资助(J06B06)

波分析应用于电磁暂态分析中, 主要求解Galerkin问题及矩量法中的波形函数的稀疏矩阵。因此, 高压远距离输电线路的电磁暂态过程分析和计算方法的研究非常必要。

与传统的差动保护原理不同<sup>[12-13]</sup>, 本文提出了基于正交投影和z变换的新型暂态差动保护新算法。首先, 根据函数逼近理论、投影变换理论以及微分算子理论, 信号可以整理为一组正交基的线性组合, 其中, 线性组合的系数称为“基底的投影”。因此, 关于电压电流的微分方程也可以用微分算子与函数自身的卷积来表示。进而, 就建立了以 $T_s$ 为采样间隔的输电线路数字方程。利用z变换, 对采样方程进行求解, 同时, 可以得到传播函数和波阻抗的z域表达式; 根据零极点估计法, 推导出传播函数和波阻抗的反z变换表达式。在电磁暂态分析的基础上, 本文提出了新型输电线路暂态差动保护算法, 本算法不需要计算微分算子的投影, 大大缩减了计算量, 提高计算速度。ATPDraw初步仿真验证表明, 该算法有比较高的精确度, 为继电保护新原理提供理论支持。

## 1 基本原理

输电线路暂态过程分析和计算的核心是对基于分布参数的线路电报方程的求解:

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

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

其中: 分布参数 $R_0$ 、 $G_0$ 、 $L_0$ 、 $C_0$ 分别为线路的电阻、电感和对地电导、电容, 单位分别为 $\Omega/\text{km}$ 、 $\text{H}/\text{km}$ 、 $\text{S}/\text{km}$ 和 $\text{F}/\text{km}$ ;  $u(x,t)$ 和 $i(x,t)$ 分别为线路任一位置 $x$ 处的电压和电流。

### 1.1 输电线路数字方程

根据正交投影和函数逼近原理可知, 任一微分函数 $f(t) \in L^2(R)$  ( $L^2(R)$ 为平方可积空间)都可以表示为<sup>[14-15]</sup>:

$$\frac{df(t)}{dt} = \frac{1}{T_s} \sum_k h_k f(t - kT_s) \quad (2)$$

其中,  $h_k$ 为微分算子 $D = d/dt$ 的投影,  $T_s$ 为采样间隔。

$$h(k) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) \phi(t - k) dt \quad (3)$$

式中:  $\phi(t)$ 为正交尺度函数;  $\psi(t) = d\phi(t)/dt$ 为正交尺度函数的导函数<sup>[16-17]</sup>。

基于公式(2), 将电报方程中关于时间 $t$ 的导数进行投影变换, 就可以得到:

$$-\frac{du(x,t)}{dx} = R_0 i(x,t) + \frac{L_0}{T_s} \sum_k h_k i(x,t - kT_s) \quad (4a)$$

$$-\frac{di(x,t)}{dx} = G_0 u(x,t) + \frac{C_0}{T_s} \sum_k h_k u(x,t - kT_s) \quad (4b)$$

将式(4)中电压电流以 $T_s$ 为采样间隔进行采样之后, 数字微分方程就变为:

$$-\frac{du(x,n)}{dx} = R_0 i(x,n) + \frac{L_0}{T_s} \sum_k h_k i(x,n - k) \quad (5a)$$

$$-\frac{di(x,n)}{dx} = G_0 u(x,n) + \frac{C_0}{T_s} \sum_k h_k u(x,n - k) \quad (5b)$$

### 1.2 电报方程z域解

利用z变换, 可得到z域内的数字采样方程:

$$-\frac{dU(x,z)}{dx} = Z(z)I(x,z) \quad (6a)$$

$$-\frac{dI(x,z)}{dx} = Y(z)U(x,z) \quad (6b)$$

其中:  $Z(z) = R_0 + L_0 \mathbf{H}(z)/T_s$ ;  $Y(z) = G_0 + C_0 \mathbf{H}(z)/T_s$ , z域内投影变换矩阵 $\mathbf{H}(z) = \sum h_k z^{-k}$ 。

z变换后的电报方程的解与时域内表达式相似, 如式(7):

$$U(x) = \frac{U_m + Z_c I_m}{2} \exp(-\gamma x) + \frac{U_m - Z_c I_m}{2} \exp(\gamma x) \quad (7a)$$

$$I(x) = \frac{U_m + Z_c I_m}{2Z_c} \exp(-\gamma x) - \frac{U_m - Z_c I_m}{2Z_c} \exp(\gamma x) \quad (7b)$$

其中:  $U_m$ 、 $I_m$ 分别代表着线路始端M侧z域内的电压电流;  $\gamma = \sqrt{ZY}$ 称为传播参数;  $Z_c = \sqrt{Z/Y}$ 称为波阻抗。

由公式(6)可得:

$$-\frac{dF(x,z)}{dx} = -\frac{dU(x,z) + Z_c I(x,z)}{dx} = \sqrt{Z(z)Y(z)}F(x,z) \quad (8a)$$

$$-\frac{dB(x,z)}{dx} = -\frac{dU(x,z) - Z_c I(x,z)}{dx} = \sqrt{Z(z)Y(z)}B(x,z) \quad (8b)$$

与传统Laplace方法相似, 可以推导得到z域内前行波和反行波的传播关系式:

$$F_x(z) = A_x(z)F_m(z) \quad (9a)$$

$$B_m(z) = A_x(z)B_x(z) \quad (9b)$$

其中:  $F = U + Z_c I$ 为前行波;  $B = U - Z_c I$ 称为反行波, 而z域内的传播函数为

$$A_x(z) = \exp(-x\sqrt{Z(z)Y(z)}) \quad (10)$$

通过反z变换, 如果能得到波阻抗和传播函数, 就可以根据首端的电压和电流得到首端的前行波和反行波, 从而得到线路上任意位置的前行波和反行波, 进而计算出线路上任意位置的电压和电流。

### 1.3 传播函数的反z变换

上述分析中的z域内的传播函数, 经过一些化简后得到:

$$A_x(z) = \exp(-x\sqrt{(R_0 + L_0\mathbf{H}(z)/T_s)(G_0 + C_0\mathbf{H}(z)/T_s)}) = \exp(-\frac{x}{T_s c}\sqrt{(\mathbf{H}(z)+a)(\mathbf{H}(z)+b)}) \quad (11)$$

其中:  $c = 1/\sqrt{L_0 C_0}$  为行波传播速度;  $a = R_0 T_s / L_0$ ,

$$b = G_0 T_s / C_0。$$

现定义传播基函数为:

$$A_0(z) = \exp(-\sqrt{(\mathbf{H}(z)+a)(\mathbf{H}(z)+b)}) \quad (12)$$

假设单位距离  $\Delta x = c T_s$ ,  $m = x / \Delta x$ , 则

$$A_x(z) = (A_0(z))^m \quad (13)$$

对于无损线路,  $a=0, b=0$ 。所以, 传播基函数为:

$$A_0(z) = \exp(-\mathbf{H}(z)) = z^{-1} \quad (14)$$

即可知,  $\mathbf{H}(z) = j\omega$ 。并代入式 (12):

$$A_0(z) = \exp(-\sqrt{(j\omega + a)(j\omega + b)}) \quad (15)$$

对于式 (14) 的反z变换应用零极点估计法, 可得:

$$A_0(z) = \frac{\alpha_0 + \alpha_1 z^{-1} + \dots + \alpha_m z^{-m}}{1 + \beta_1 z^{-1} + \dots + \beta_n z^{-n}} \quad (16)$$

因此, 传播函数的反z变换为:

$$A_x(z) = [A_0(z)]^x = z^{-N_{\min}} \frac{\alpha_0 + \alpha_1 z^{-1} + \dots + \alpha_m z^{-m}}{1 + \beta_1 z^{-1} + \dots + \beta_n z^{-n}} \quad (17)$$

其中,  $N_{\min} = T_{\min} / T_s$ ,  $T_{\min}$  为传播的最短时间,  $T_s$  为采样间隔。

#### 1.4 波阻抗的反z变换

z域内的波阻抗可整理为:

$$Z_c = \sqrt{\frac{R_0 + L_0\mathbf{H}(z)/T_s}{G_0 + C_0\mathbf{H}(z)/T_s}} = Z_{c0} \sqrt{\frac{\mathbf{H}(z)+a}{\mathbf{H}(z)+b}} \quad (18)$$

其中,  $Z_{c0} = \sqrt{L_0 / C_0}$ 。

与传播函数的反z变换计算过程相似, 利用零极点估计法来计算波阻抗的反z变换, 得到:

$$Z_c(z) = Z_{c0} \left( \sum_k \lambda_k z^{-k} \right) \quad (19)$$

#### 1.5 暂态过程的数字算法

假设已知输电线路的分布参数, 利用泊松级数定理, 可以离线计算出传播函数  $\{\beta_k\}$  和波阻抗  $\{z_{Ck}\}$  的反z变换表达式。根据线路首端M侧已知的电压  $u_m(k)$ 、电流  $i_m(k)$  采样值, 可以按式 (20) 得到前行波和反行波:

$$f_m(n) = u_m(n) + \sum_l Z_{cl} i(n-l) \quad (20a)$$

$$b_m(n) = u_m(n) - \sum_l Z_{cl} i(n-l) \quad (20b)$$

将始端M侧行波与传播函数系数进行卷积就可以得到线路任意位置x处的行波。

$$f_x(n) = f_m * a_x(n) = \sum_l \beta_l f_m(n-l) \quad (21a)$$

$$b_x(n) = b_m * a_x^{-1}(n) = \sum_l \beta_l' b(n-l) \quad (21b)$$

线路任意位置x处的电压电流可以计算得到:

$$u_x(n) = (f_x(n) + b_x(n)) / 2 \quad (22a)$$

$$i_x(n) = (f_x(n) - b_x(n)) / 2 \quad (22b)$$

## 2 暂态差动保护新原理

假设某一单相输电线路MN, 线路长度为L, 如图1所示。

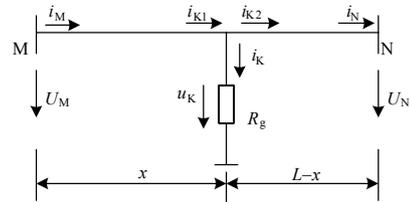


图1 线路故障示意图

Fig.1 Faulted line model

### 2.1 差动保护判据

当在线路区外故障或者无故障时, 线路MN两侧的传播关系没有被破坏, 由公式 (9) 可知, M侧和N侧的反行电压波、前行电压波的传播关系为:

$$B_M(z) = A_L(z) B_N(z) \quad (23a)$$

$$F_N(z) = A_L(z) F_M(z) \quad (23b)$$

在M侧和N侧分别定义:

$$B_{op}(z) = A_L(z) B_N(z) \quad (24a)$$

$$F_{op}(z) = A_L(z) F_M(z) \quad (24b)$$

由此在两侧构造线路纵联保护差动判别式:

$$\Delta B_M = \|B_{op}(z) - B_M(z)\| \quad (25a)$$

$$\Delta F_N = \|F_{op}(z) - F_N(z)\| \quad (25b)$$

式 (25) 中 “ $\| \cdot \|$ ” 表示2-范数, 即其有效值。很显然, 当没有故障发生, 或者发生区外故障时, 上述两个判别式应该等于零:

$$\Delta B_M = 0 \quad (26a)$$

$$\Delta F_N = 0 \quad (26b)$$

当发生区内故障时, 假设在K点发生短路故障, K点距离M点的距离为x, 根据传播关系可以得到两

侧判别式为:

$$\Delta B_M = \|\exp(-\gamma x) Z_c I_K\| \quad (27a)$$

$$\Delta F_N = \|\exp(-\gamma(L-x)) Z_c I_K\| \quad (27b)$$

其中,  $I_K$  为短路点的短路电流。

得到的保护判据为:

$$\Delta B_M > B_{\text{set}} \quad (28a)$$

$$\Delta F_N > F_{\text{set}} \quad (28a)$$

其中,  $B_{\text{set}}$  和  $F_{\text{set}}$  分别为两侧差动判别式的门槛值。

## 2.2 保护判据的实现

以M侧为例, 保护装置可以得到M侧的电压  $u_M(k)$  和电流  $i_M(k)$ , 利用通信装置, 同样可以得到对侧的电压  $u_N(k)$  和电流  $i_N(k)$ 。这样, 就可以得到两侧的反行波:

$$b_M(k) = u_M(k) - Z_c i_M(k) \quad (29a)$$

$$b_N(k) = u_N(k) - Z_c i_N(k) \quad (29b)$$

式中, 波阻抗取工频下的值  $Z_c = \sqrt{X_1/B_1}$ ,  $X_1$

为每公里长的电抗,  $B_1$  为每公里长的电纳。波阻抗采取这样的近似会带来一定的误差, 但我们后面用参数估计的方法, 将这一误差在传播函数中进行弥补 (包括由互感器传变带来的误差)。

因此, 在离散的时域内, 就可以得到:

$$b_{\text{op}}(k) = \sum_{l=0}^m \alpha_l b_N(k - N_{\text{min}} - l) - \sum_{l=1}^n \beta_l b_{\text{op}}(k - l) \quad (30)$$

取一个时间窗  $W$ , 得到实时的反行波差动量:

$$\Delta b_M(k) = \frac{1}{W} \sqrt{\sum_{l=k-W}^k |b_{\text{op}}(l) - b_M(l)|^2} \quad (31)$$

同理可以得到N侧的实时前行波差动量。

## 2.3 传播函数的实时在线拟合

在这个保护原理中, 传播函数是否准确成为保护是否可靠的关键, 虽然我们可以根据线路的分布参数对传播函数的参数进行拟和, 但这样拟合出的参数取决于线路分布参数是否准确, 而且由于互感器频率特性的影响, 实际测量的两侧行波的传播关系并不完全满足线路一次侧的传播关系。同时, 我们在前行波和反行波的计算中, 波阻抗采用工频下的值, 这些误差都导致保护中所用的线路传播函数与实际线路的传播函数不一致。因此这些参数最好的方法是根据线路无故障时两端实测的数据进行实时在线拟合。

线路无故障时, 两侧行波的关系 (以M侧为例):

$$b_M(k) = \sum_{l=0}^m \alpha_l b_N(k - N_{\text{min}} - l) - \sum_{l=1}^n \beta_l b_M(k - l) \quad (32)$$

利用两侧在  $k$  时刻至  $k-p-N_{\text{min}}-m$  时刻的采样值构成方程, 写成矩阵形式, 即:

$$B_0 = B_1 C \quad (33)$$

其中,  $B_0 = [b_M(k-p), \dots, b_M(k)]^T$  为  $p \times 1$  矩阵;

$$B_1 = \begin{bmatrix} b_N(k-p-N_{\text{min}}) & \dots & b_N(k-p-N_{\text{min}}-m) & b_M(k-p-1) & \dots & b_M(k-p-n) \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_N(k-N_{\text{min}}) & \dots & b_N(k-N_{\text{min}}-m) & b_M(k-1) & \dots & b_M(k-n) \end{bmatrix}$$

为  $p \times (m+n)$  矩阵;  $C = [\alpha_0, \dots, \alpha_m, \beta_1, \dots, \beta_n]^T$  为  $(m+n) \times 1$  矩阵。

利用最小二乘法, 可以估计出:

$$C = (B_1^T B_1)^{-1} B_1^T B_0 \quad (34)$$

## 2.4 门槛值的选取

根据公式 (27) 可知, 当发生区内故障时, M 侧的差动量大约为:  $\Delta b_M \approx \|Z_c I_K\|$ , 门槛值的选择的原则为:

(1) 在区内末端发生最轻微故障时, 门槛值应低于此时的差动量。

(2) 门槛值应高于在区外出口发生最严重故障 (三相短路) 时, 测量和计算误差产生的差动量。

很显然, 最轻微的故障为单相经过过渡电阻接地, 而且保护的门槛值的选择与抗过渡电阻能力的大小有关, 假设最大抗过渡电阻为  $R_{\text{max}}$ , 那么在末端发生单相接地时的差动量大约为:

$$\Delta b_{\text{AG}} \approx \frac{Z_c}{1.732 R_{\text{max}}} U_N \quad (35)$$

考虑抗过渡电阻能力为  $500 \Omega$ , 波阻抗为  $300 \Omega$ , 考虑最大的计算误差和不平衡因素占大约 20%, 则门槛值取为:

$$B_{\text{set}} = (0.2 \sim 0.4) U_N \quad (36)$$

## 3 仿真验证

为了验证暂态分析方法的正确性, 仿真验证采用如图2所示的典型 408 kV 输电系统。利用 ATP 仿真软件进行算法验证, 线路长为 280 km, 在仿真计算中, 采样频率为 20 点/周期, 即采样间隔为 0.001 s。

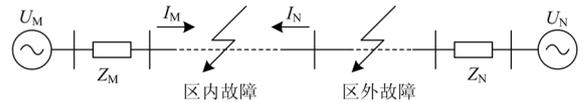


图2 仿真模型

Fig.2 Simulation model

线路参数如下:

$$E_m = 408 \angle -40^\circ \text{ kV}, Z_m = 1 + j50 \ \Omega/\text{km};$$

$$E_n = 408 \angle -60^\circ \text{ kV}, Z_n = 5 + j100 \ \Omega/\text{km};$$

线路分布参数如表 1。

表 1 线路分布参数

Tab.1 The distributed parameters

模量	电阻 / (Ω/km)	波阻抗 / Ω	波速 / (km/s)
0 模	0.103 625	895.272	252 210
1 模	0.019 396 7	345.328	294 788
2 模	0.019 601	387.593	295 260

### 3.1 线路传播函数的参数估计

当线路无故障时, 进行传播函数的参数估计, 传播函数系数取两个点,  $\alpha_1$ 和 $\alpha_2$ , 参数估计时间窗为10个点(半个周期), 参数随时间的变化曲线如图3所示, 利用拟合出的传播函数, 根据M侧的前行波计算出的N点前行波 $f_{op}$ 和N点测量的前行波 $f_n$ 比较的波形如图4所示, 拟合误差如图5所示。

从图3中可以看出, 在工频无故障情况下, 由于只知道电压和频率, 对传播函数的进行参数估计, 只能估计出传播函数系数的两个点 $\alpha_1$ 和 $\alpha_2$ , 并且,  $\alpha_1=0.056 7$ ,  $\alpha_2=0.937 6$ 。图4可以看到, 拟合的N侧前行波 $f_{op}$ 与实际测量的前行波 $f_n$ 基本吻合, 只不过在0.02 s之前, 由于时间窗宽度的影响, 设置为 $f_{op}=0$ , 但仍然能够验证理论的可行性。图5展示的是拟合误差, 误差结果的数量级为 $10^{-6}$ , 在0.06 s以后的误差不为零, 由于拟合的传播函数系数的阶数变大, 对误差产生了影响, 但并不影响整体效果。

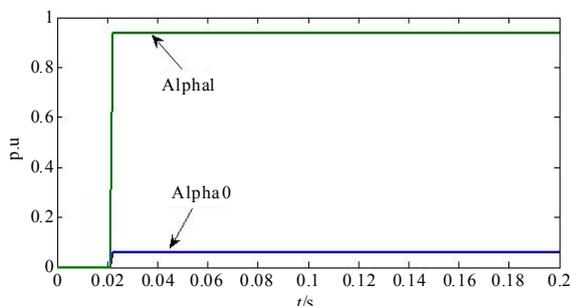


图 3 参数拟合结果

Fig.3 The parameter fitting results

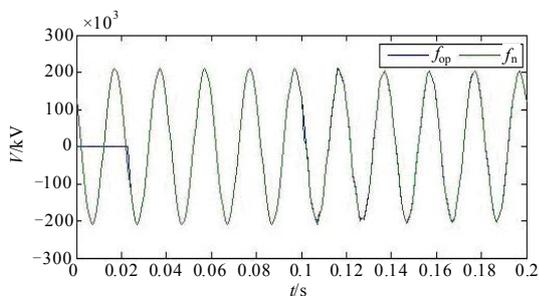


图 4 无故障时  $f_{op}$  和  $f_n$  的波形比较

Fig.4 The comparison between  $f_{op}$  and  $f_n$

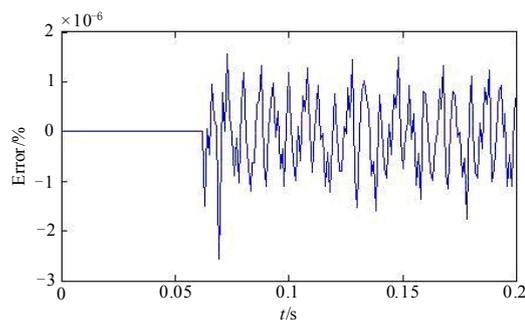


图 5 拟合误差

Fig.5 The fitting error

### 3.2 保护判据的仿真

当线路发生区内故障时, 我们以三相短路故障为例进行仿真分析。图6 (a) 为计算得到的N侧行波 $f_{op}$ 与实际N侧行波 $f_n$ 比较图, 可以看出 $f_{op}$ 与 $f_n$ 基本吻合, 变化趋势一致; 图6 (b) 为 $f_{op}$ 与 $f_n$ 的误差图, 在故障后, 计算误差小于40%。误差计算方法为:

$$\text{误差} = \frac{\text{计算行波} - \text{实际行波}}{|\text{实际行波}|} \times 100 \quad (37)$$

图6 (c) 展示的是按照本文方法得到的起动值和制动值的变化曲线, 当系统发生故障后, 行波的起动值在故障发生时大于制动值, 保护能够可靠动作。

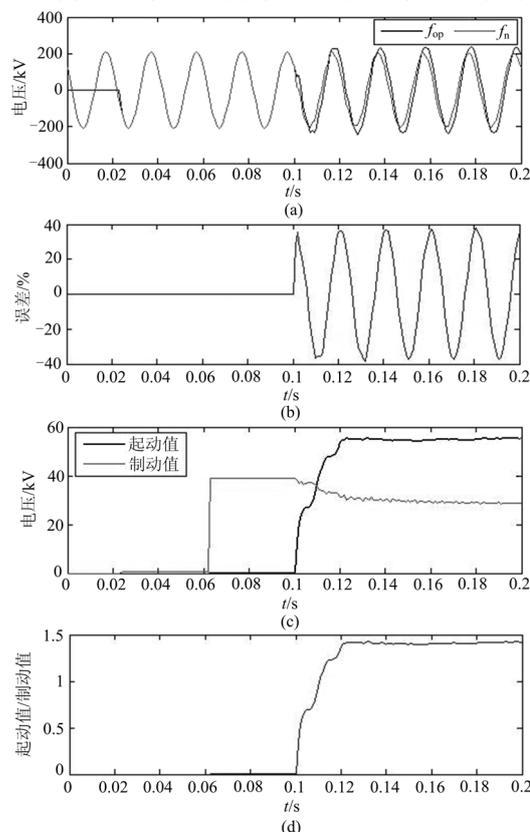


图 6 区内故障曲线图

Fig.6 The protection curve when inner fault occurs

从图6(d)中可以看出,区内故障起动作与制动值之比在1.5左右,保护可靠动作。从图6(d)还可以看出,新型差动保护可以在10ms之内发出跳闸命令,满足超高压、长距离输电线路对继电保护主保护的要求。

正向区外故障和反向区外故障的仿真图如图7、8所示。同样对实际行波与计算行波进行仿真比较,对于不同故障类型,保护能够正确反应保护动作情况。

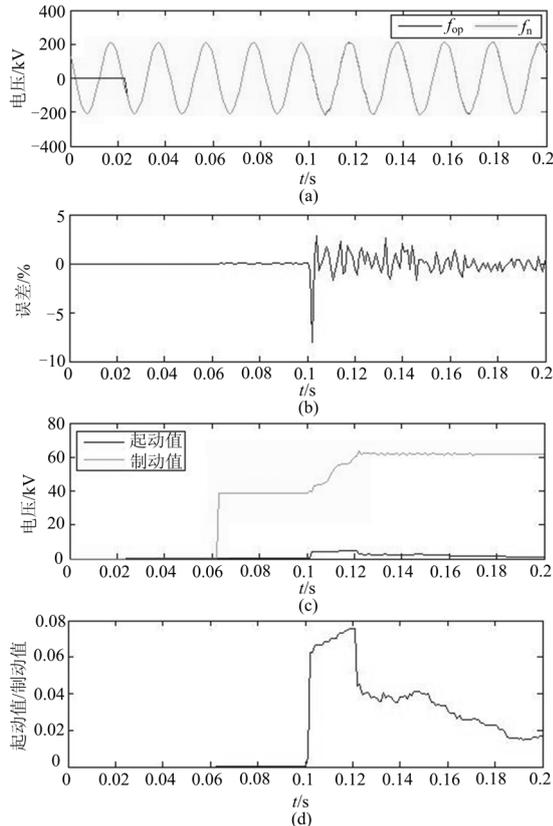


图7 正向区外故障曲线图

Fig.7 The curve when external fault occurs at terminal N

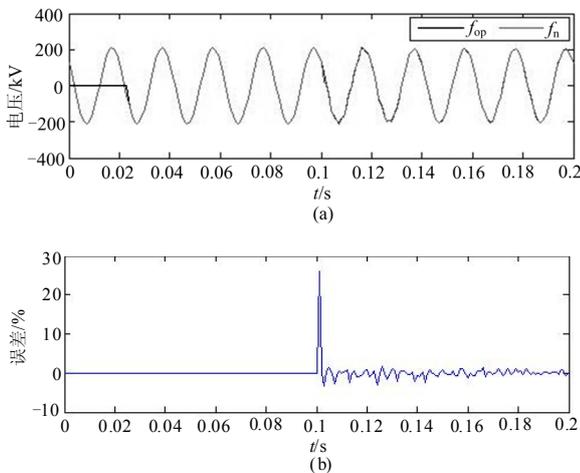


图8 反向区外故障曲线图

Fig.8 The curve when external fault occurs at terminal M

综合比较图7、8,可以看出,无论是正向区外故障还是反向区外故障,计算得到的行波与实际行波变化趋势相同,误差分别在5%和30%左右。线路发生区外故障,故障后起动作明显大于制动值,并且两者比值在0.08和0.35左右,远远小于1,保护可靠不动作。

#### 4 结论

本文是对基于投影变换理论的继电保护新原理的探讨,突破了传统的思维,利用微分算子和z变换理论,提出了一种新型暂态差动保护算法。在对传播函数的参数进行拟合之后,结合行波理论,构造保护判据。ATP仿真结果表明,该算法运算量大大减少,具有较高的准确度和可靠性,能够瞬时分辨区内外故障,在10ms内正确动作。

#### 参考文献

- [1] Shen Lin, Ernest S Kuh. 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.
- [2] Marti J R. Accurate modeling of frequency dependent transmission lines in electromagnetic transient simulation[J]. IEEE Trans Power Apparatus Syst, 1982, 101: 147-155.
- [3] 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.
- [4] 王大鹏, 魏佩瑜, 王婧, 等. 输电线路暂态计算与分析方法的发展与展望[J]. 继电器, 2007, 35(6): 10-15. WANG Da-peng, WEI Pei-yu, WANG Jing, et al.

- Development and prospect of transmission line transient analysis and calculation theories[J]. Relay, 2007, 35(6): 10-15.
- [5] Griffith J R, Nakhla M. Time-domain analysis of lossy coupled transmission lines[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 1990(38): 1480-1487.
- [6] 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.
- [7] Miranda G C D, Emilio A, Araujo A D, 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.
- [8] Dao J, Jin J. A general approach for the stability analysis of the time domain finite element method for electromagnetic simulations[J]. IEEE Trans Ant Prop, 2002, 50(11): 1624-1632.
- [9] Amaratunga K, Williams J. Wavelet-galerkin solution for one-dimensional partial differential equations[J]. Int Jour for Num Meth in Eng, 1994 (32) : 2703-2716.
- [10] Pan G. Orthogonal wavelets with application in electromagnetism[J]. IEEE Trans Mag-32, 1996: 975-983.
- [11] Chui C K. Wavelets: a tutorial in theory and applications[M]. New York: Academic Press, 1992.
- [12] 徐松晓, 贺家李, 李永丽, 等. 特高压输电线分相电流相位差动保护的研究[J]. 继电器, 2007, 35 (3) : 1-5, 24.  
XU Song-xiao, HE Jia-li, LI Yong-li, et al. Research on segregated current phase differential protection for UHV transmission lines[J]. Relay, 2007, 35 (3) : 1-5, 24.
- [13] 廖晓玉, 臧睿, 胡家跃. 光纤电流差动保护及其整定计算[J]. 继电器, 2006, 34 (21) : 9-13.  
LIAO Xiao-yu, ZANG Rui, HU Jia-yue. Line fiber optical differential protection and its setting calculation[J]. Relay, 2006, 34 (21) : 9-13.
- [14] Mallat S. A theory for multiresolution signal decomposition[J]. IEEE Trans on Pattern Anal Machine Intell, 1989, 11 (7) : 674-693.
- [15] Saito N, Beylkin G. Multiresolution representations using the auto-correlation functions of compactly supported wavelets[J]. Proceedings of ICASSP-92, 4: 381-384.
- [16] HA Heng-xu, ZHANG Bao-hui, Lü Zhi-lai. A novel principle of single-ended fault location technique for EHV transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(4): 1147-1151.
- [17] 哈恒旭, 王婧, 谭雨珍, 等. 基于微分算子逼近的单端故障测距新原理[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(3): 69-73.  
HA Heng-xu, WANG Jing, TAN Yu-zhen, et al. A novel single-ended fault location principle based on the differential operator approach[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (3) : 69-73.

---

收稿日期: 2009-11-15; 修回日期: 2010-04-13

作者简介:

谭雨珍 (1984-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: friendlytz@126.com

哈恒旭 (1972-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统继电保护;

段宇菁 (1969-), 男, 本科, 研究方向为计算机应用。

---

(上接第 20 页 continued from page 20)

- WANG Jun-fei, ZHAO Guo-sheng, BAI Rong. A novel shunt hybrid active power filter based on magnetic flux compensation[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36 (13): 37-42.
- [6] 谢冰若, 陈乔夫, 田军, 等. 基于基波磁通补偿的串联混合型APF滤波特性分析[J]. 电力系统自动化, 2004, 31 (20): 75-79.  
XIE Bing-ruo, CHEN Qiao-fu, TIAN Jun, et al. Analysis on filtering characteristic of series hybrid active power filter based on fundamental magnetic flux compensation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 31 (20): 75-79.
- [7] 李达义, 陈乔夫, 贾正春. 一种实用的基于基波磁通补偿的串联混合型有源电力滤波器[J]. 电工技术学报, 2003, 18 (1): 68-71.  
LI Da-yi, CHEN Qiao-fu, JIA Zheng-chun. A practical series hybrid active power filter based on fundamental magnetic flux compensation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003, 18 (1): 68-71.
- [8] 王德发, 丁洪发. 串联混合型有源滤波器的建模及控制策略分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(20): 70-74.  
WANG De-fa, DING Hong-fa. Modeling and control strategy analysis of series hybrid type active power filters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (20): 70-74.

---

收稿日期: 2009-11-12; 修回日期: 2010-04-27

作者简介:

刘卫民 (1984-), 男, 硕士研究生, 从事电力电子在电力系统中的应用方面的研究; E-mail: midealwm@126.com

赵国生 (1965-), 男, 博士, 副教授, 从事电力电子在电力系统中的应用方面的研究。