

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201061

基于重构误差及多尺度交叉样本熵的谐振接地系统故障选线

田业¹, 徐天奇¹, 李琰¹, 邓小亮², 王阳光²

(1. 云南民族大学电气信息工程学院, 云南 昆明 650504; 2. 国网湖南省电力有限公司, 湖南 长沙 410004)

摘要: 针对大量应用电缆线路导致的谐振接地系统单相接地故障时选线正确率下降的问题, 提出一种基于计算馈线暂态零序电流重构误差及其低频分量多尺度交叉样本熵的故障选线方法。谐振接地系统单相接地故障时由于消弧线圈补偿作用, 故障线路暂态零序电流相位、周期变化均与健全线路不同。利用相位变化不同, 通过同步挤压小波逆变换对暂态零序电流进行重构并计算误差。利用周期变化不同计算暂态零序电流低频分量多尺度交叉样本熵。重构误差、交叉样本熵之和均为最大值的线路即为故障线路。大量仿真结果证明, 该方法受不同故障条件影响较小, 可靠性高, 抗干扰性强。

关键词: 配电网; 谐振接地系统; 故障选线; 同步挤压小波变换; 多尺度交叉样本熵

Fault line selection in a resonant earthed system based on reconstruction error and multi-scale cross-sample entropy

TIAN Ye¹, XU Tianqi¹, LI Yan¹, DENG Xiaoliang², WANG Yangguang²

(1. School of Electrical and Information Technology, Yunnan Minzu University, Kunming 650504, China;

2. State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha 410004, China)

Abstract: There is a problem that the decrease in accuracy of single-phase grounding fault line selection is because of a large number of cable lines in the resonant earthed system. To solve this, a fault line selection method is proposed based on calculating the reconstruction error of the transient zero sequence current of lines and the multi-scale cross-sample entropy of the transient low frequency bands. Because of the compensation effect of the arc suppression coil, the change of phase and period of transient zero sequence current in a fault line are different from those of a sound line when single-phase grounding occurs in a resonant earthed system. Using the principle of different phase changes, the transient zero sequence current is reconstructed by inverse synchrosqueezed wavelet transforms and the error is calculated. According to the principle of different period changes, the multi-scale cross-sample entropy of the low frequency bands of the transient zero sequence current is calculated. The fault line is determined when the sum of reconstruction errors and the cross sample entropy are at a maximum. A large number of simulation results show that the method is less affected by different fault conditions, and has high reliability and strong anti-interference.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 61761049).

Key words: distribution network; resonant earthed system; fault line selection; synchrosqueezed wavelet transforms; multi-scale cross-sample entropy

0 引言

配电线路接地故障多为单相接地故障。为限制故障电流, 配电网中性点多采用经消弧线圈接地方式。消弧线圈的补偿作用及电缆线路的广泛使用, 使谐振接地系统故障特征更为复杂, 传统选线方法

可靠性降低。

配电网单相接地故障选线研究较为丰富, 主要有基于时频分析方法的暂态能量法^[1-4]、注入法^[5]、功率法^[6-7]、导纳法^[8-9]、相关分析法^[10]、频域参数识别法^[11]、聚类分析法^[12]、神经网络及融合原理法^[13-14]等。文献[15]利用消弧线圈补偿作用使故障线路对地电容近似熵增大的原理构成选线判据, 但近似熵易受嵌入维数等参数影响, 一致性差。文献

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61761049)

[16]提出一种基于改进暂态非工频能量法及五次谐波极性差异的选线方法。该方法虽然通过引入Kolmogorov-Smirnov 校验法解决模态分解易出现的模态混叠现象,但需设定校验参数阈值,且在高阻接地时五次谐波分量较小,易出现误判。文献[17]提出一种利用同步向量测量技术计算故障线路与健全线路两端零序电压差,并引入故障测度因子构成判据的选线方法。但该方法忽略了架空线路两端零序电压差较小,易受噪声影响的问题,且广域测量系统中大量数据传输时存在数据丢失的可能^[18],可靠性有待验证。文献[19]提出一种基于故障线路与健全线路暂态零序电流高低频段分量不同的选线方法,通过比较特定参数交叉相乘后的差值构成判据,但该方法并未考虑线缆混合线路,且为避免由于电缆线路与架空线路差异性较大引起的误判,忽略了机械性去掉最大差值后可能造成的选线错误。文献[20]提出了一种基于交叉小波变换的选线方法,通过绘制交叉功率谱及相位平稳性校验等方法,不仅解决了分布式电源注入谐波对特征频段选取的影响,也适用于线缆混合和线路及双出线系统。但该方法需计算各馈线能量,对所有馈线两两作交叉小波变换,相位平稳性校验等,计算量较大。文献[21]利用故障线路与健全线路导纳不对称度的差异完成故障选线。理论上该方法不受过渡电阻大小的影响,但需精确测量每条馈线对地电容。

基于上述情况,本文并不基于暂态能量、特征频段和导纳等现有选线原理对含有大量电缆线路或双出线的系统进行选线,而是利用谐振接地系统故障线路暂态零序电流相位、周期变化均比健全线路复杂的原理,计算由同步挤压小波变换自身局限性导致的信号重构误差的同时,凭借低通滤波器提取暂态零序电流低于工频的分量并计算多尺度交叉样本熵,最后将重构误差及多尺度样本熵分别求和,进而识别故障线路。仿真结果表明所提方法选线可靠性高,适用性广。

1 谐振接地系统故障暂态特征

不计线路零序阻抗时,第 k 条线路发生单相接地故障后零序网络图可简化为图 1^[1]。由图 1 可知,各健全线路零序电流可简单表示为

$$i_{0n} = -C_{0n} \frac{du_0}{dt} \quad (n \neq k) \quad (1)$$

而故障线路零序电流可表示为

$$i_{0k} = -i_{0L} + \sum_1^n i_{0n} \quad (n \neq k) \quad (2)$$

式中: n 为馈线数; u_0 为母线零序电压值; i_{0n} 为第 n 条线路首端流过的零序电流值; C_{0n} 为第 n 条线路等效对地电容。图 1 中, \dot{U}_{f0} 为故障点处等效零序电源; R_f 为过渡电阻; L 、 R 分别为消弧线圈零序电感、等效电阻。

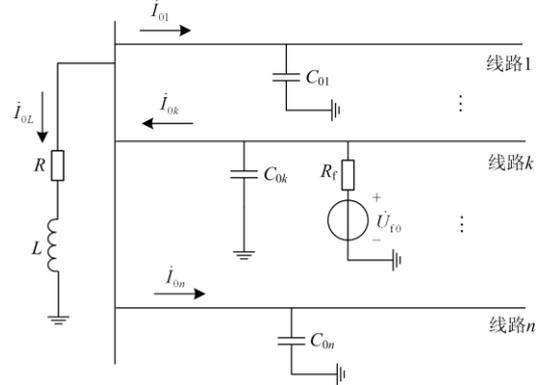


图 1 零序网络简化图

Fig. 1 Simplified circuit of zero sequence network

若以二阶等效电路分析谐振接地系统单相接地故障时的暂态过程,等效电路图如图 2 所示。其中: R_0 为零序通路等值电阻; L_0 、 C_0 分别为零序通路中三相线路和电源变压器等的等值电感和对地电容; u_{0f} 为零序电源电压。

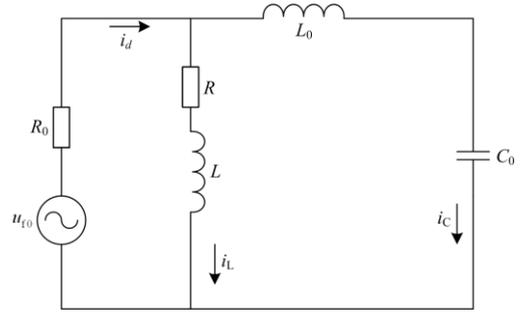


图 2 故障等效电路图

Fig. 2 Fault equivalent circuit diagram

通过对图 2 列写微分方程,求解可得故障线路首端的暂态零序电流为^[22]

$$i_{0k} = i_d = i_c + i_L = (I_C - I_L) \cos(\omega t + \varphi) + I_C \left(\frac{\omega_f}{\omega} \sin \varphi \sin \omega t - \cos \varphi \cos \omega_f t \right) e^{-t/\tau_c} + I_L \cos \varphi e^{-t/\tau_L} \quad (3)$$

式中: I_C 、 I_L 分别为电容电流和电感电流的幅值; ω_f 为暂态自由振荡分量的角频率; ω 为工频; φ 为零序电压的初始相位; τ_L 、 τ_c 分别为电感回路与电

容回路的时间常数。

结合上述分析可知^[22], 暂态电感电流仅在故障线路中流通, 当故障发生在相电压峰值时, 暂态电感分量最小, 暂态电容分量最大; 当故障发生在相电压过零点附近时, 情况则相反。

2 选线理论

2.1 同步挤压小波变换

同步挤压小波变换(Synchrosqueezed Wavelet Transforms, SST)是一种类似于经验模态分解的时频重排分析方法, 具有严格的数学推导过程, 能够获得更加清晰的时频曲线。SST主要有以下步骤^[23]:

将信号 $s(t)$ 进行连续小波变换

$$W_s(a, b) = \int s(t) a^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (4)$$

式中: ψ 、 $\bar{\psi}$ 为小波母函数及其共轭函数, 其傅里叶变换满足 $\hat{\psi}(\omega) = 0, \omega < 0$; a 、 b 分别为尺度、平移因子。

对于任意小波系数 $W_s(a, b) \neq 0$, $s(t)$ 都存在瞬时频率 $\omega_s(a, b)$ 且满足式(5)。

$$\omega_s(a, b) = -i(W_s(a, b))^{-1} \frac{\partial}{\partial b} W_s(a, b) \quad (5)$$

利用式(5)即可将小波系数由时间-尺度域转换到时间-频率域, 经过挤压时频空间内中心频率 ω_l 附近的小波系数可得同步挤压变换量值。Daubechies 等人的研究指出^[23]在中心频率附近的连续区间 $\left[\omega_l - \frac{1}{2}\Delta\omega, \omega_l + \frac{1}{2}\Delta\omega\right]$ 的同步挤压变换量值仅与中心频率有关, 因此同步挤压变换的离散表达式可写为

$$T_s(\omega_l, b) = (\Delta\omega)^{-1} \sum_{a_k: |\omega(a_k, b) - \omega_l| \leq \Delta\omega/2} W_s(a_k, b) a_k^{-3/2} (\Delta a)_k \quad (6)$$

式中: a 利用 a_k 进行离散化, $a_k - a_{k-1} = (\Delta a)_k$; 频率采用线性频率离散化, 满足 $\omega_l - \omega_{l-1} = \Delta\omega$ 。

同步挤压逆变换为

$$s(t) \approx \text{Re} \left[C_\psi^{-1} \sum_k W_s(a_k, b) a_k^{-3/2} (\Delta a)_k \right] = \text{Re} \left[C_\psi^{-1} \sum_l T_s(\omega_l, b) (\Delta\omega) \right] \quad (7)$$

式中: $C_\psi = \frac{1}{2} \int_0^\infty \overline{\hat{\psi}(\xi)} \frac{d\xi}{\xi}$; l 为中心频率数。

2.2 多尺度交叉样本熵

样本熵及交叉样本熵(Cross-Sample Entropy, CSE)

都可以描述有限时间序列的不规则度^[24], 且受嵌入维数影响较小, 一致性好。前者克服了近似熵自匹配的缺陷, 倾向于描述有限时间序列的波动性及不规则性; 后者用于描述两个不同时间序列的异步程度。异步程度越大, 熵值越大。交叉样本熵具体计算方法如下:

对于两个具有相同长度的离散时间序列 $x(1), x(2), \dots, x(N)$ 与 $y(1), y(2), \dots, y(N)$, 给定嵌入维数 m , 可分别构造 $N-m$ 个 m 维向量:

$$\begin{cases} X_m(i) = (x(i), \dots, x(i+m-1)) & 1 \leq i \leq N-m \\ Y_m(j) = (y(j), \dots, y(j+m-1)) & 1 \leq j \leq N-m \end{cases} \quad (8)$$

定义上述 $X_m(i)$ 与 $Y_m(j)$ 各自标量分量的最大差值为两者之间的距离, 即

$$d[X_m(i), Y_m(j)] = \max_{0 \leq k \leq m-1} \{|x(i+k) - y(j+k)|\} \quad (9)$$

给定相似容限 $r > 0$, 对于每一个 $1 \leq i \leq N-m$ 计算满足 $d[X_m(i), Y_m(j)] < r$ 的数目并求平均值 A , 记作:

$$A_r^m(r) = \text{num}\{d[X_m(i), Y_m(j)] < r\} \quad (10)$$

$$A^m(r) = \frac{1}{N-m} \sum_{i=1}^{N-m} A_r^m(r) \quad (11)$$

将嵌入维数改为 $m+1$ 并重复上述步骤, 得到 $A^{m+1}(r)$, 则可定义交叉样本熵为

$$\text{Cross-SpEn} = -\ln\left(\frac{A^{m+1}(r)}{A^m(r)}\right) \quad (12)$$

多尺度交叉样本熵(Multi-scale Cross-Sample Entropy, MCSE)计算方法如下^[25-26]。

1) 将给定的两个长度相同的离散时间序列 $x(i) = \{x(1), \dots, x(N)\}$ 与 $y(i) = \{y(1), \dots, y(N)\}$ 按照式(13)标准化。

$$\begin{cases} X_{\text{norm}}(i) = [x(i) - m(x)]/s(x) \\ Y_{\text{norm}}(i) = [y(i) - m(y)]/s(y) \end{cases} \quad (13)$$

式中: $m(x)$ 、 $m(y)$ 分别为时间序列 $x(i)$ 、 $y(i)$ 的平均值; $s(x)$ 、 $s(y)$ 分别为上述时间序列的标准差。

2) 构造粗粒化时间序列 X^τ 与 Y^τ

$$\begin{cases} X^\tau = \tau^{-1} \sum_{i=(j-1)\tau+1}^{j\tau} X_{\text{norm}}(i) \\ Y^\tau = \tau^{-1} \sum_{i=(j-1)\tau+1}^{j\tau} Y_{\text{norm}}(i) \end{cases} \quad 1 \leq j \leq \frac{N}{\tau} \quad (14)$$

3) 对每个粗粒化时间序列重复前述交叉样本熵的计算步骤, 即可得到多尺度交叉样本熵。

3 单相接地故障选线方法

3.1 基于 SST 重构误差的选线原理

SST 能通过逆变换无损重构信号的表述并不准确。文献[27]指出 SST 变换对于脉冲类信号进行重构时误差会增加。本文则从 SST 本身局限性出发, 简单说明相位变化对于 SST 重构误差的影响。

SST 变换在推导过程中有以下假设:

(1) 在由式(4)向式(6)的推导过程中, 将信号 $s(t)$ 假设为形如 $s(t) = A \cos(\omega t)$ 的纯谐波信号;

(2) 推导 SST 逆变换时, 将任意信号假设为形如 $s(t) = \sum_{i=1}^N s_i(t) = \sum_{i=1}^N A_i(t) \cos(\varphi_i(t))$ 的 N 个信号叠加, 并作以下近似条件作为逆变换证明的出发点:

$$s(t) \Big|_{[T-\Delta t, T+\Delta t]} \approx \sum_{i=1}^N A_i(t) \cos[\varphi_i(T) + \varphi_i'(T)(t-T)] \quad (15)$$

式中: $A_i(t)$ 、 $\varphi_i(T)$ 分别为原始信号分量的调幅和调相函数; $\Delta t = 2\pi/\omega \approx 2\pi/\varphi_i'(T)$ 。

由假设(1)可知 SST 变换本身并不具备普适性, 需要作相应的假设及误差证明才能推广至大多数信号; 由假设(2)可知, 式(15)为 SST 逆变换重构误差的主要原因之一。由于 $\varphi_i(T)$ 为分量信号 i 的相位, 因此其在 T 处必然可导。根据泰勒公式, 可得 T 点处 $\varphi_i(T)$ 的完整展开式为

$$\varphi_i(t) = \varphi_i(T) + \varphi_i'(T)(t-T) + \frac{\varphi_i''(T)}{2!}(t-T)^2 + \dots + \frac{\varphi_i^{(n)}(T)}{n!}(t-T)^n + R_n(t) \quad (16)$$

结合式(15)及式(16)可知, $|t-T|$ 足够小时, 当分量信号 i 的相位为固定值或线性变化时, 式(15)中 $\varphi_i(T)$ 的展开式可认为完全等于信号分量 i 在 T 处的真实相位, 但分量信号 i 的相位为非线性变化时, 其相位变化速率越快, 即相位函数的导数绝对值越大, 展开式与真实相位差距越大。

综上所述, 对于 SST 逆变换的准确表述应为: 当信号相位为固定值或线性变化时, SST 的逆变换能够无损重构信号; 当信号相位呈现非线性变化时, SST 的逆变换近似重构信号, 且相位变化越快, 重构误差越大。基于此结论, 根据式(1)可知, 单相接地故障时各健全线路零序电流仅与线路首端零序电压变化率及线路对地电容有关, 具有基本一致的相位变化, 所以健全线路零序电流的重构误差较小且基本一致; 根据式(2)、式(3)可知, 暂态电感电流的流入使故障线路暂态零序电流的相位变化比健全线

路的相位变化更为复杂, 重构误差更大。根据这一原理, 按照式(17)计算各线路暂态零序电流重构误差序列的绝对值之和 Q_n , 最大值对应的线路即为故障线路。

$$Q_n = \sum_{k=1}^N |I_{0n}^{\text{res}}(k) - I_{0n}(k)| \quad (17)$$

式中: I_{0n} 、 I_{0n}^{res} 分别为线路 n 首端暂态零序电流的采样值及重构值; k 为采样点数。

3.2 基于 MCSE 的选线原理

SST 具有良好的抗噪能力。通过设定阈值, 滤去小于阈值的连续小波变换系数后再挤压重排即可降噪。但面对短时较大幅度干扰时, 由于难以准确列出复杂电力系统的状态方程, 因此无法采用卡尔曼滤波等数字滤波技术滤除非正常观测量, 可能会影响故障选线。同时, 由于母线故障时各馈线暂态零序电流的重构误差均很小, 难以准确设定母线故障的整定值。基于上述情况, 引入基于各馈线暂态零序电流低频分量的 MCSE 之和的选线方法。该方法具有能够仅衡量不同信号间周期差异, 不受信号幅值大小影响及抗噪性能较好的特点。

根据式(3), 由 $I_L = U_L/\omega L$ 可知故障后系统未达到新的稳态时, 消弧线圈在低频时段的补偿作用更明显, 对故障线路暂态零序电流低频分量幅值及周期影响较大, 而健全线路暂态零序电流低频分量之间由于均未流入暂态电感电流, 周期差距极小。基于此, 首先按式(18)计算多尺度交叉样本熵矩阵 $\mathbf{p}_{ij}^{\text{MCSE}}$ 。

$$\mathbf{p}_{ij}^{\text{MCSE}} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1j} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2j} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ p_{i1} & p_{i2} & \cdots & p_{ij} \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} 1 \leq i \leq n \\ 1 \leq j \leq n \end{matrix} \quad (18)$$

式中, 对角线元素 p_{ii} 为零, 其余矩阵元素对角相等,

$$p_{ij} = \sum_{a=1}^M p_{ij}^{\text{CSE}}(a), \quad M \text{ 为最大尺度值。}$$

对上述矩阵按行求和即可得到各馈线故障特征 $\mathbf{P}_n = [p_1^{\text{MCSE}}, \dots, p_n^{\text{MCSE}}]$, 其最大值对应的线路即为故障线路。对于母线故障, 则通过设置整定值 $p_{\text{set}}^{\text{MCSE}}$ 来区分。由于故障发生在母线上时, 各馈线暂态零序电流周期基本一致, p_n^{MCSE} 应为零。为留有裕度, 设定 $p_{\text{set}}^{\text{MCSE}} = 0.6$ 。当 $p_n^{\text{MCSE}} < p_{\text{set}}^{\text{MCSE}}$ 时, 判定故障发生在母线上。

虽然多尺度分析广泛应用于探讨不同尺度情况下对熵值的影响, 有助于更好地了解时间序列不规则度。但尺度分析范围应合理, 需参考采样频率、

系统周期等条件, 保证以最大尺度粗粒化时间序列后产生的新序列有足够数据来计算 CSE。

3.3 选线步骤

基于上述选线原理的分析, 给出本文选线流程图, 如图 3 所示。图中 U_0 和 U 为母线零序电压及额定电压。

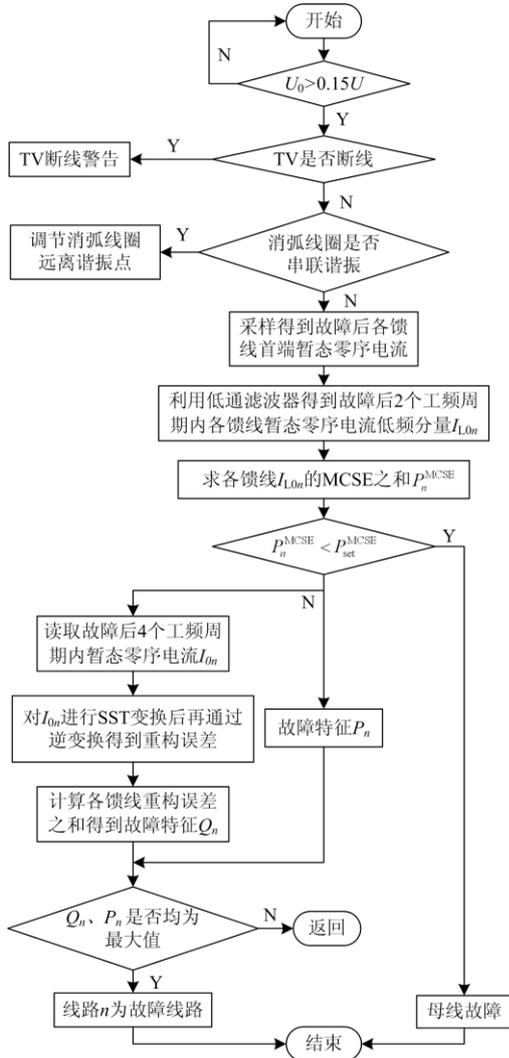


图 3 单相接地故障选线流程图

Fig. 3 Flow chart of single phase grounding fault line selection

1) 确定故障发生后, 启动基于 MCSE 的选线判据。其中, 设定嵌入维数 m 为 2, 相似容限 r 为所比较的两线路暂态零序电流序列经标准化后标准差的平均值, 最大尺度数 M 为 10。若计算值大于整定值, 则进入下一步; 否则判定母线故障。

2) 排除母线故障后, 在数据窗口长度一致的前提下启动基于 SST 重构误差的选线判据。相关参数设为: 连续小波母函数采用 morlet 小波; n_s 为 64 (频率间隔细化程度)。

3) 计算故障特征值 P_n 、 Q_n , 若两种特征值的最大值在同一数位, 则判定该数位对应线路即为故障线路, 否则认为选线判据不充分, 重新选线。

4 仿真实证

4.1 仿真模型

利用 PSCAD 软件搭建配网谐振接地系统仿真模型。消弧线圈电感值为 0.296 H, 等值电阻为 2.793 9 Ω , 过补偿度为 8%。采样频率为 10 000 Hz。拓扑图见图 4。线路参数见表 1。其中 R、L、C 分别为线路电阻、电感和对地电容, 下标 1、0 分别代表正序、零序参数。

表 1 线路参数表

Table 1 Line parameters table

线路参数	架空线路	电缆线路
$R_1 / (\Omega/\text{km})$	0.125 0	0.270 0
$L_1 / (\text{mH}/\text{km})$	1.300 0	0.255 0
$C_1 / (\mu\text{F}/\text{km})$	0.009 6	0.339 0
$R_0 / (\Omega/\text{km})$	0.275 0	2.700 0
$L_0 / (\text{mH}/\text{km})$	4.600 0	1.019 0
$C_0 / (\mu\text{F}/\text{km})$	0.005 4	0.280 0

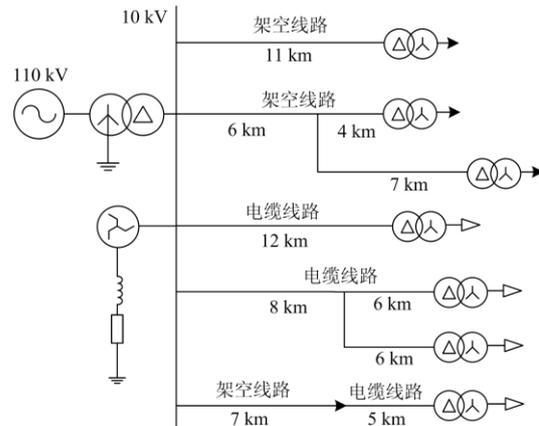


图 4 谐振接地系统模型

Fig. 4 Resonant earthed system model

4.2 算例分析

将线路按照由上至下的顺序编号。设定线路 3 距离母线 6 km 处发生单相接地故障, 过渡电阻为 0.1 Ω , 故障初相角 0° 。为便于对比电流特征, 一般仅展示故障线路 3 及健全线路 4 的暂态零序电流波形。图 5 为线路 3、4 的暂态零序电流波形。

图 6 为线路暂态零序电流低频分量波形。由图 6 可知, 故障线路暂态零序电流低频分量的周期与健全线路的相差较多。图 7 为线路 4、5 的暂态零序电流低频分量波形。由图 7 可知, 健全线路之间的

暂态零序电流低频分量具有基本一致的周期，与前述结论一致。

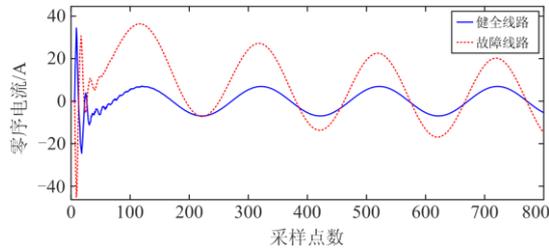


图 5 暂态零序电流波形图

Fig. 5 Transient zero sequence current waveform

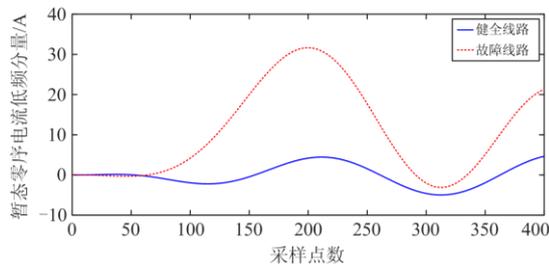


图 6 暂态零序电流低频分量波形图

Fig. 6 Low frequency bands waveform of transient zero sequence current

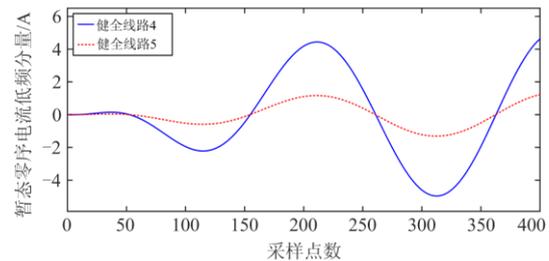


图 7 健全线路暂态零序电流低频分量波形图

Fig. 7 Low frequency bands waveform of transient zero sequence current between sound lines

首先利用暂态零序电流低频分量计算线路 3、4 之间的 MCSE。如图 8 所示，所有尺度下故障线路的交叉样本熵均大于健全线路，故障特征明显。各馈线故障特征 $P_n = [1.7, 1.7, 6.9, 1.7, 1.7]$ ，排除母线故障，初步判定线路 3 为故障线路。

然后进行下一判据工作。由于仅需要信号瞬时相位，不需要相位对时间进行求导，因此不用对信号进行集合经验模态分解，可直接利用希尔伯特变换求取线路 3、4 暂态零序电流的相位图，如图 9 所示。

由图 9 可知，故障后初期，故障线路暂态零序电流的相位变化不仅属于非线性变化，且变化较大。在系统趋于稳态的过程中，故障线路暂态零序电流

相位逐渐靠近健全线路暂态零序电流的线性相位。通过 SST 的逆变换重构线路 3、4 的暂态零序电流，如图 10 和图 11 所示。

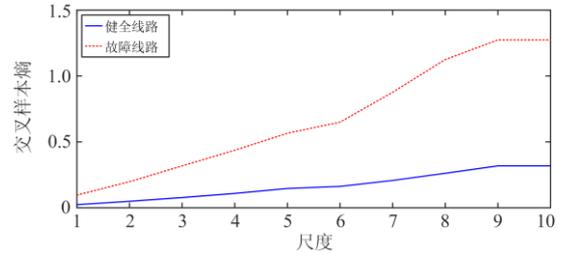


图 8 不同线路间多尺度交叉样本熵

Fig. 8 Multi-scale cross-sample entropy between different lines

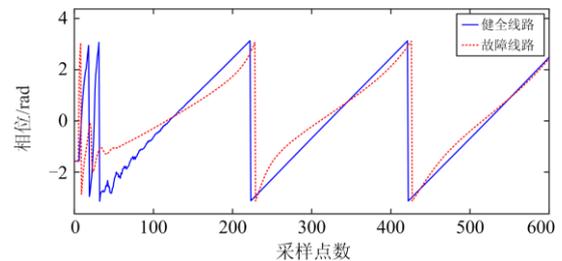


图 9 暂态零序电流相位图

Fig. 9 Phase diagram of transient zero sequence current

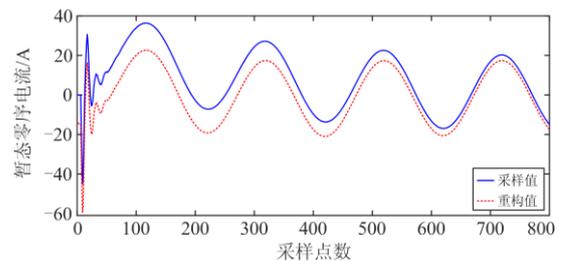


图 10 故障线路 3 暂态零序电流重构误差示意图

Fig. 10 Reconstruction error diagram of transient zero sequence current of fault line 3

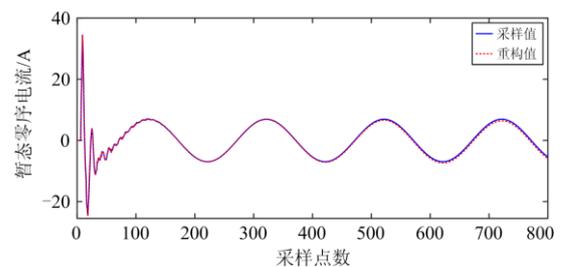


图 11 健全线路 4 暂态零序电流重构误差示意图

Fig. 11 Reconstruction error diagram of transient zero sequence current of sound line 4

从图 10 可以看出，故障线路暂态零序电流的重构误差在故障初期较大，随着系统趋于新的稳态，其重构误差也逐渐减小，符合图 9 中故障线路暂态

零序电流的相位变化趋势。由图 11 可知健全线路暂态零序电流的重构误差一直保持极小的趋势, 重构值与采样值基本重合, 验证了 3.1 节中所述重构误差来源结论的正确性。计算故障特征 $Q_n = [2.8, 4.3, 6437.1, 132.9, 34.7]$, 结合 P_n 可知线路 3 为故障线路, 选线正确。

4.3 普适度分析

模拟不同合闸角、故障距离和补偿度等故障条件下的选线, 通过仿真结果验证选线方法的正确性及普适性。由于篇幅所限, 仅随机列出部分仿真结果。

1) 不同故障角

设定线路 1 距离母线 6 km 处发生单相接地故障, 过渡电阻为 500 Ω 。由表 2 可知, 无论故障发生在相电压峰值还是过零点, 均能正确选线, 且故障线路特征较为明显。

表 2 不同故障角时选线结果

$\theta/^\circ$	$P_n/Q_n [P_1/Q_1, P_2/Q_2, P_3/Q_3, P_4/Q_4, P_5/Q_5]$	结果
0	[3.7/370.2, 0.9/1.0, 0.9/1.0, 0.9/51.1, 0.9/13.7]	T
45	[4.0/353.1, 1.0/1.7, 1.0/52.5, 1/87.5, 1.0/23.1]	T
90	[3.6/230.9, 0.9/1.5, 0.9/43.6, 0.9/73.3, 0.9/19.2]	T

2) 不同故障距离

表 3 为线路 2 在合闸角 90°、过渡电阻 500 Ω 时, 不同故障距离下的仿真结果。从表 3 中可得, 故障距离对选线方法影响较小, 选线灵敏度基本不变。

表 3 不同故障距离时选线结果

L/km	$P_n/Q_n [P_1/Q_1, P_2/Q_2, P_3/Q_3, P_4/Q_4, P_5/Q_5]$	结果
2	[0.8/1.5, 3.3/227.9, 0.9/43.4, 0.9/72.7, 0.9/19.0]	T
6	[0.8/1.5, 3.4/227.2, 0.9/42.6, 0.9/71.7, 0.8/18.8]	T
10	[0.9/1.5, 3.5/222.4, 0.9/41.6, 0.9/69.8, 0.9/18.3]	T

3) 不同过渡电阻

线缆混合线路 5 距离母线 6 km 处发生合闸角为 90° 的故障时, 不同过渡电阻下的仿真结果见表 4。由表 4 可知, 过渡电阻大小对故障特征 Q_n 影响较大, 但对 P_n 的影响有限, 而且随着过渡电阻的增加, P_n 减小趋势放缓, 健全线路与故障线路的区别依旧明显, 证明本文选线方法在高阻接地时具有明显优势。

4) 不同补偿度

设定线路 4 在相电压相角 45°、距离母线 6 km 处发生故障, 过渡电阻为 500 Ω , 不同补偿度条件下选线结果见表 5。

表 4 不同过渡电阻时选线结果

Table 4 Results of line selection under different transition resistance

R_f/Ω	$P_n/Q_n [P_1/Q_1, P_2/Q_2, P_3/Q_3, P_4/Q_4, P_5/Q_5]$	结果
0.1	[0.6/5.0, 0.6/7.7, 0.6/140.3, 0.6/234.0, 2.4/6128.5]	T
500	[0.5/1.5, 0.5/2.4, 0.7/43.1, 0.8/72.4, 2.6/243.4]	T
1 000	[0.9/0.7, 0.9/1.0, 0.9/18.9, 0.9/31.9, 3.5/112.7]	T
2 000	[0.9/0.3, 0.9/0.4, 0.9/7.3, 0.9/12.3, 3.5/52.1]	T

表 5 不同补偿度时选线结果

Table 5 Line selection results with different compensation degrees

$P/\%$	$P_n/Q_n [P_1/Q_1, P_2/Q_2, P_3/Q_3, P_4/Q_4, P_5/Q_5]$	结果
8	[0.5/1.8, 0.5/2.8, 0.5/52.0, 2.0/415.1, 0.5/22.9]	T
10	[0.5/1.9, 0.5/2.9, 0.5/53.6, 2.1/419.6, 0.5/23.6]	T

5) 母线故障

当母线发生故障时, 不同故障条件下的选线结果见表 6。由表 6 可知, 母线故障时 P_n 序列为零, 小于整定值, 选线正确。

表 6 母线故障时选线结果

Table 6 Results of line selection of bus fault

R_f/Ω	$\theta/^\circ$	$P_n [P_1, P_2, P_3, P_4, P_5]$	结果
0.1	0	[0, 0, 0, 0, 0]	T
500	45	[0, 0, 0, 0, 0]	T
1 000	90	[0, 0, 0, 0, 0]	T

6) 叠加噪声

设定故障发生在线路 4、线路 2 及母线(代号 6)处。在所有馈线暂态零序电流中加入信噪比为 20 dB 的高斯白噪声, 故障条件及选线结果见表 7。由表 7 可知, 母线故障时由于噪声影响, 故障特征 P_n 不为零, 但其中所有元素均小于整定值, 选线正确。

表 7 叠加噪声时选线结果

Table 7 Results of line selection with noise

线路	R_f/Ω	$\theta/^\circ$	$P_n/Q_n [P_1/Q_1, P_2/Q_2, P_3/Q_3, P_4/Q_4, P_5/Q_5]$	结果
2	0.1	0	[2.7/3.2, 10.7/12823.1, 3.2/91.5, 2.5/161.2, 2.6/41.1]	T
4	500	45	[0.9/1.8, 0.9/2.7, 1.0/53.0, 3.3/412.6, 0.9/20.6]	T
6	1 000	90	$P_n = [0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1]$	T

7) 间歇性电弧接地故障

依据文献[28]设置电弧模型。假设线路在 0.027 s 即 A 相电压正向幅值最大时发生单相电弧接地。燃弧时刻分别为 0.027 s、0.047 s、0.067 s, 熄弧时刻分别为 0.037 s、0.057 s。选线结果如表 8 所示。

8) 其他情况

假设图 4 中模型只有线路 1、3 和 5 接入, 线路 3 长度改为 16 km, 线路 5 改为 9 km 架空线路, 补

偿度不变。线路 1 发生接地故障。故障后 $T/4$ 内线路 1、3 的暂态零序电流的幅值大小极为接近,故障选线结果见表 9。

表 8 间歇性电弧故障时的选线结果

Table 8 Results of fault line selection under arcing fault occurs

线路	L/km	$P_n/Q_n [P_1/Q_1, P_2/Q_2, P_3/Q_3, P_4/Q_4, P_5/Q_5]$	结果
1	1	[6.7/1624.4, 1.7/9.2, 1.7/168.3, 1.7/281.8, 1.7/74.3]	T
4	4	[1.6/5.8, 1.6/8.9, 1.6/163.2, 6.3/2618.3, 1.6/72.0]	T
5	7	[2.0/4.7, 2.0/7.3, 2.0/133.2, 2.0/222.0, 8.0/5480.7]	T

表 9 选线结果

Table 9 Results of fault line selection

L/km	R_f/Ω	$\theta/(^\circ)$	$P_n/Q_n [P_1/Q_1, P_3/Q_3, P_5/Q_5]$	结果
2	0.1	0	[3.6/5977.7, 1.8/121.7, 1.8/2.6]	T
6	500	45	[2.3/311.8, 1.2/120.8, 1.2/2.6]	T
6	1000	90	[1.8/115.73, 0.9/67.5, 0.9/1.5]	T

5 结论

为解决具有大量线缆混合线路及双出线结构的配网系统在单相接地故障时能量法、导纳法等选线方法可靠性降低的问题,本文提出一种基于重构误差及 MCSE 联合判据的选线方法。利用故障线路和健全线路之间暂态零序电流周期、相位的差异性,通过计算两种判据下各馈线的故障特征来实现故障选线。所提方法总结如下:

1) 暂态电感电流仅流入故障线路,造成故障线路暂态零序电流周期及相位变化与健全线路不同。

2) 高阻接地造成的电流幅值减小和暂态过程缩短,对故障特征 Q_n 灵敏度的影响较大,但 P_n 基本不受影响。从整体看,不同线路间的故障特征 Q_n 的差异性更明显且稳定,更有利于选线装置动作。因此联合判据选线与普通多数据融合选线的不同之处在于倾向优势互补。如基于能量法和五次谐波法的融合选线,在高阻接地时暂态能量减小,五次谐波幅值同样减小而不易于测量极性,选线可靠性的提升有限。

3) 通过仿真软件验证了本文选线方法在不同故障条件下均能正确选线,抗噪性好,硬件要求低。CT 反接时,故障特征 Q_n 不受影响, P_n 可能出现选线错误,因此对 CT 极性不明时的选线方法有待进一步分析。

参考文献

[1] 束洪春, 朱梦梦, 黄文珍, 等. 基于暂态零序电流时频

特征量的配网故障选线方法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(9): 1-6.

SHU Hongchun, ZHU Mengmeng, HUANG Wenzhen, et al. Faulty line selection based on time-frequency characteristics of transient zero-sequence current[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(9): 1-6.

[2] 束洪春, 彭仕欣. 基于短窗数据 S 变换能量的缆-线混合配电网故障选线方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(10): 152-159.

SHU Hongchun, PENG Shixin. A fault line detection algorithm for distribution network of overhead line and underground cable mixed lines using S-Transform energy from short window data[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(10): 152-159.

[3] 吴乐鹏, 黄纯, 林达斌, 等. 基于暂态小波能量的小电流接地故障选线新方法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(5): 70-75.

WU Lepeng, HUANG Chun, LIN Dabin, et al. Faulty line selection based on transient wavelet energy for non-solid-earthed network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(5): 70-75.

[4] 李天云, 王飞, 祝磊, 等. 基于固有模态能量熵的配电网单相接地故障选线新方法[J]. 电网技术, 2008, 32(增刊 2): 128-132.

LI Tianyun, WANG Fei, ZHU Lei, et al. A new method of distribution network single-phase ground fault line selection based on the intrinsic mode energy entropy[J]. Power System Technology, 2008, 32(S2): 128-132.

[5] 樊淑娴, 徐丙垠, 张清周. 注入方波信号的经消弧线圈接地系统故障选线方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(4): 91-95.

FAN Shuxian, XU Bingyin, ZHANG Qingzhou. A new method for fault line selection in distribution system with arc suppression coil grounding with square-wave signal injection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(4): 91-95.

[6] 梁睿, 辛健, 王崇林, 等. 应用改进型有功分量法的小电流接地选线[J]. 高电压技术, 2010, 36(2): 375-379.

LIANG Rui, XIN Jian, WANG Chonglin, et al. Fault line selection in small current grounding system by improved active component method[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(2): 375-379.

[7] 潘本仁, 宋华茂, 张秋凤, 等. 小电流接地故障无功功率分析及选线新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(14): 51-56.

PAN Benren, SONG Huamao, ZHANG Qiufeng, et al. Reactive power analysis and novel faulty selection method in resonant grounding system[J]. Power System

- Protection and Control, 2017, 45(14): 51-56.
- [8] 李振兴, 王新, 王鹏飞, 等. 综合工频与特征频率零序导纳角差的选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(12): 13-21.
LI Zhenxing, WANG Xin, WANG Pengfei, et al. Line selection method based on the zero-sequence admittance angle difference of power frequency and characteristic frequency[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12): 13-21.
- [9] 李振兴, 王新, 王鹏飞, 等. 综合工频与特征频率零序导纳角差的选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(12): 13-21.
LI Zhenxing, WANG Xin, WANG Pengfei, et al. Line selection method based on the zero-sequence admittance angle difference of power frequency and characteristic frequency[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12): 13-21.
- [10] 周军, 刘娜, 李曙光. 基于等效半波注入法的小电流接地故障选线[J]. 电测与仪表, 2020, 57(4): 55-60.
ZHOU Jun, LIU Na, LI Shuguang. Small current grounding fault line selection based on equivalent half wave injection method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(4): 55-60.
- [11] 索南加乐, 李宗朋, 王莉, 等. 基于频域参数识别方法的配电网单相接地故障选线[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(23): 93-97, 125.
SUONAN Jiale, LI Zongpeng, WANG Li, et al. Fault line selection in distribution networks based on parameter identification method in frequency domain[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(23): 93-97, 125.
- [12] 李雅洁, 孟晓丽, 宋晓辉, 等. 基于最优 FIR 滤波器与层次聚类的配电网单相接地故障选线方法[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 143-149.
LI Yajie, MENG Xiaoli, SONG Xiaohui, et al. Single-phase-to-ground fault line detection for distribution network based on optimal finite impulse response filter and hierarchical clustering[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 143-149.
- [13] 孟安波, 葛佳菲, 李德强, 等. 基于纵横交叉算法的神经网络配电网故障选线研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(21): 90-95.
MENG Anbo, GE Jiafei, LI Deqiang, et al. Research on fault line selection of distribution network using RBF neural network based on crisscross optimization algorithm optimization[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 90-95.
- [14] 赵建文, 李科, 随晓娜, 等. 多级数据模糊融合选线新方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(2): 56-60.
ZHAO Jianwen, LI Ke, SUI Xiaona, et al. New fault line selection method of multilevel fuzzy data fusion[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2016, 28(2): 56-60.
- [15] 殷家敏, 吉畅, 罗建, 等. 基于电容序列近似熵的消弧线圈接地选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 45-50.
YIN Jiamin, JI Chang, LUO Jian, et al. Fault line selection approach of extinction coil based on capacitance sequence approximate entropy[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 45-50.
- [16] 金涛, 褚福亮. 基于暂态非工频零序电流的含 DG 新型配电网的接地选线方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(17): 96-105.
JIN Tao, CHU Fuliang. A fault line-selection method in new distribution network with DG based on transient non-power frequency zero sequence current[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(17): 96-105.
- [17] 梁睿, 杨学君, 彭楠, 等. 基于广域零序分布电压特征的小电流接地选线方法[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 3236-3242.
LIANG Rui, YANG Xuejun, PENG Nan, et al. A method for single-line-to-ground fault feeder selection based on the characteristic of wide area zero sequence voltage[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 3236-3242.
- [18] APPASANI B, MOHANTA D K. A review on synchrophasor communication system: communication technologies, standards and applications[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(4): 383-399. DOI: 10.1186/s41601-018-0110-4.
- [19] 龙茹悦, 黄纯, 汤涛, 等. 一种谐振接地系统的配电网线路接地故障选线新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(21): 21-29.
LONG Ruyue, HUANG Chun, TANG Tao, et al. Line selection method for grounding fault in resonant grounding distribution systems[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(21): 21-29.
- [20] 何瑞江, 胡志坚, 王天一. 计及分布式电源注入谐波的谐振接地系统故障选线方法[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 670-680.
HE Ruijiang, HU Zhijian, WANG Tianyi. A fault line selection method for resonant grounding system considering injected harmonics of distributed generation[J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 670-680.
- [21] 韦莉珊, 贾文超, 焦彦军. 基于 5 次谐波与导纳不对称度的配电网单相接地选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(15): 77-83.
WEI Lishan, JIA Wenchao, JIAO Yanjun. Single-phase

- fault line selection scheme of a distribution system based on fifth harmonic and admittance asymmetry[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2020, 48(15): 77-83.
- [22] 束洪春. 配网选线保护与故障定位[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [23] DAUBECHIES I, LU J, WU H T. Synchrosqueezed wavelet transforms: an empirical mode decomposition-like tool[J]. *Applied and Computational Harmonic Analysis*, 2011, 30(2): 243-261.
- [24] RICHMAN J S, MOORMAN J R. Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy[J]. *American Journal of Physiology Heart & Circulatory Physiology*, 2000, 278(6): 2039-2049.
- [25] COSTA M, GOLDBERGER A L, PENG C K. Multiscale entropy analysis of complex physiologic time series[J]. *Physical Review Letters*, 2002, 89(6).
- [26] 金宁德, 高忠科. 非线性信息处理技术[M]. 天津: 天津大学出版社, 2017.
- [27] HE D, CAO H, WANG S, et al. Time-reassigned synchrosqueezing transform: the algorithm and its applications in mechanical signal processing[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 117: 255-279.
- [28] 李淑蓉, 薛永端, 徐丙垠, 等. 小电流接地故障电弧建模及过电压分析[J]. *电力科学与技术学报*, 2019, 34(1): 47-53.
- LI Shurong, XUE Yongduan, XU Bingyin, et al. Arc modeling and overvoltage analysis in non-solidly earthed networks[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2019, 34(1): 47-53.
-
- 收稿日期: 2020-08-30; 修回日期: 2020-12-14
- 作者简介:
- 田业(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: 1067544926@qq.com
- 徐天奇(1978—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统规划、运行与保护, 智能电网, 新能源发电并网; E-mail: xu.tianqi@gmail.com
- 李琰(1977—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为智能电网, 电力系统通信, 无线传感网等。E-mail: liyan.hust@gmail.com
- (编辑 周金梅)