

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190848

基于变异系数与高阶累积量的小电流接地故障选线

曾志辉, 肖宇

(河南理工大学电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454000)

摘要: 针对现有谐振接地系统的暂态量选线法准确性不高的问题, 提出一种基于变异系数与高阶累积量的小电流接地故障选线。首先利用变异系数求解零序电流故障分量的初始极性, 判断其是线路故障或是母线故障。若为线路故障, 则利用变分模态分解对各出线零序电流进行分解, 提取出零序电流的直流分量和工频交流分量。最后结合直流分量的高阶累积量和工频交流分量的初始极性构造判据, 最终实现双重极性选线。仿真结果表明, 该方法不受故障合闸角、过渡电阻的影响。

关键词: 谐振接地系统; 故障选线; 变异系数; 高阶累积量; 变分模态分解; 双重极性

Small current grounding fault selection based on coefficient of variation and high order cumulant

ZENG Zhihui, XIAO Yu

(School of Electrical Engineering & Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: In order to solve the problem that the accuracy of transient fault line selection method of resonant earthing system is not high, a small current fault line selection method based on the coefficient of variation and high order cumulant is proposed. First, the initial polarity of the fault component of zero-sequence current is solved using the coefficient of variation. If it is a line fault, the zero-sequence current of each outgoing line is decomposed by means of variational mode decomposition, and the DC component and power-frequency AC component of zero-sequence current are extracted. Finally, the dual polarity selection is realized by combining the high order accumulator of the DC component and the initial polarity construction criterion of the AC component of the power frequency. Simulation results show that this method is not affected by fault closing angle and transition resistance.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61703144) and Science and Technology Key Project of Henan Province (No. 182102210051).

Key words: resonant grounding system; fault line selection; coefficient of variation; higher order cumulant; variational modal decomposition; dual polarity

0 引言

我国中低压配电网主要采用小电流接地系统^[1], 其中主要采用中性点经消弧线圈接地。当单相接地时, 在接地点就有一个电感分量的电流通过, 此电流和原系统中的电容电流相抵消, 可以减少流经故障点的电流, 熄灭电弧。但由于消弧线圈的补偿作用, 单相接地故障电流较小, 不利于故障选线, 而且在相电压过零点附近发生接地故障时, 暂态故障

电流更小, 使得准确选取故障线路难度更大。

对于已提出的小电流接地系统故障选线方法可大致分为两类, 即人为干预和智能检测。其中人为干预的选线方法主要为注入信号法^[2-3], 该方法通过检测注入的特定信号实现选线, 但此类方法成本高、操作较复杂。智能检测又大致分为稳态量选线^[4-6]和暂态量选线。在谐振接地系统中, 由于消弧线圈的补偿作用, 稳态零序电流幅值较小, 故障馈线零序电流的相位发生改变, 基于稳态量选线方法不再适用。而由于故障瞬间谐振接地系统具有丰富的故障暂态特征信息, 使得基于暂态量的选线方法效果显著, 主要有 S 变换^[7-8]、EMD 算法^[9-11]、Prony

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61703144); 河南省科技攻关项目资助(182102210051)

算法^[12]、小波变换^[13-15]等。文献[7]利用 s 变换提取暂态能量参数和综合相角参数,利用欧式特征距离实现故障选线。文献[10]利用 EMD 算法提取高频分量,并利用波形相关系数实现选线,但 EMD 算法在分解过程中易发生模态混叠。文献[11]为了消除 EMD 算法的模态混叠问题,利用 EEMD 算法和 Hilbert 变换构建虚相位角,并结合 SVM 分类实现选线,但 EEMD 算法在分解后信息不直观。文献[14]利用小波变换求取小波系数,根据故障馈线暂态小波能量最大原理进行选线,但小波变换基函数的选取自适应性不高。近年来一些先进信号提取算法^[16-19]也被广泛应用于故障选线,文献[16]提出利用变分模态分解,通过“两步走”的分解方法,得到零序电流的衰减直流分量,并通过模态能量和一阶差分进行选线,但该方法中的模态能量无法在衰减直流分量较小时,有效判断出故障线路,且变分模态分解的参数确定方法存在不足。

高阶累积量是近年来快速发展的信号提取算法,其理论上可以完全消除噪声的影响,提高分析和辨识精度,较传统功率谱或相关函数方法具有更好的抗噪能力,在电力系统领域^[20-21]已经成功应用。

为了更好地反映衰减直流分量的非线性特征,提出一种基于变异系数和高阶累积量的小电流故障选线方法,通过高阶累积量反映各线路衰减直流分量的非线性特征,初步判断出故障线路,并利用变异系数反映各线路零序电流和工频交流分量的初始集中趋势,判断各线路的初始极性,最终利用高阶累积量和变异系数实现双重极性选线。

1 接地故障暂态分析

中性点经消弧线圈接地系统发生单相接地故障的等效电路如图 1 所示, R_0 、 L_0 分别为零序回路中的等效电阻和电感, R_L 、 L 分别为消弧线圈的有功损耗电阻和电感, u_0 为等效零序电源电压, C 为系统对地电容总和。

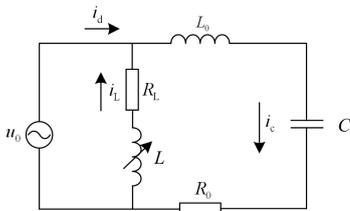


图 1 暂态电流等效电路

Fig. 1 Transient current equivalent circuit

根据不同的回路,可得下列微分方程:

$$R_0 i_c + L_0 \frac{di_c}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i_c dt = U_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

$$U_m \sin(\omega t + \varphi) = r_L i_L + L \frac{di_L}{dt} \quad (2)$$

式中: φ 表示故障合闸角; i_c 、 i_L 分别为暂态电容电流和电感电流,联立式(1)和式(2)可得暂态接地电流为

$$i_d = i_c + i_L = (I_{CM} - I_{LM}) \cos(\omega t + \varphi) + I_{CM} \left(\frac{\omega_f}{\omega} \sin \varphi \cdot \sin \omega t - \cos \varphi \cdot \cos \omega_f t \right) e^{-\sigma t} + I_{LM} \cos \varphi e^{-\frac{t}{T_L}} \quad (3)$$

式中: σ 表示自由震荡的衰减系数; ω_f 为暂态自由振荡分量的角频率。由式(3)可知,暂态接地电流主要由工频分量、衰减直流分量和暂态高频分量组成。当 $\varphi = 0^\circ$ 时,暂态高频分量最小,直流分量最大,当 $\varphi = 90^\circ$ 时,暂态高频分量最大,直流分量最小。

2 理论分析

2.1 高阶累积量

若定义 k 个连续随机变量 x_1, x_2, \dots, x_k 的概率密度函数为 $f(x_1, \dots, x_k)$, 则对应的第一联合特征函数可定义为

$$\Phi(\omega_1, \dots, \omega_k) = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} e^{j(\omega_1 x_1 + \dots + \omega_k x_k)} f(x_1, \dots, x_k) dx_1 \dots dx_k \quad (4)$$

式中, $f(x)$ 为概率密度函数。

第 2 联合特征函数定义为 $\Phi(\omega_1, \dots, \omega_k)$ 的自然对数,定义式如下:

$$\Psi(\omega_1, \dots, \omega_k) = \ln \Phi(\omega_1, \dots, \omega_k) \quad (5)$$

由此,随机变量 x_1, x_2, \dots, x_k 的 r 阶联合累积量定义为

$$C_{r_1 r_2 \dots r_k} = \text{cum}(x_1^{r_1}, \dots, x_k^{r_k}) = (-j)^r \frac{\partial^r \Psi(\omega_1, \dots, \omega_k)}{\partial \omega_1^{r_1} \partial \omega_2^{r_2} \dots \partial \omega_k^{r_k}} \Big|_{\omega_1 = \omega_2 = \dots = \omega_k = 0} \quad (6)$$

在实际应用中,令 $r_1 = \dots = r_k = 1$, 则 k 个随机变量的 k 阶累积量为

$$C_{1 \dots 1} = \text{cum}(x_1, \dots, x_k) = (-j)^k \frac{\partial^k \Psi(\omega_1, \dots, \omega_k)}{\partial \omega_1 \partial \omega_2 \dots \partial \omega_k} \Big|_{\omega_1 = \omega_2 = \dots = \omega_k = 0} \quad (7)$$

若 $x(t)$ 为平稳连续随机信号,则由式(6)可得三阶累积量的定义为

$$C_{3x}(\tau_1, \tau_2) = cum\{x(t), x(t+\tau_1), x(t+\tau_2)\} \quad (8)$$

根据高阶矩和高阶累积量的转换关系^[22], 可利用高阶矩求解出高阶累积量, 令 $x = [x_1, \dots, x_k]$ 是一随机向量, 且 $E\{|x_i|^n\} \leq \infty, i=1, \dots, k, n \gg 1$, 则对于满足 $|v| \ll n$ 的 v , 高阶矩和高阶累积量之间的存在下列转换关系:

$$m_{(v)} = \sum_{\lambda^{(1)} + \dots + \lambda^{(q)} = v} \frac{1}{q!} \frac{v!}{\lambda^{(1)}! \dots \lambda^{(q)}!} \prod_{p=1}^q c_{(\lambda^{(p)})} \quad (9)$$

$$c_{(v)} = \sum_{\lambda^{(1)} + \dots + \lambda^{(q)} = v} \frac{(-1)^{q-1}}{q!} \frac{v!}{\lambda^{(1)}! \dots \lambda^{(q)}!} \prod_{p=1}^q m_{(\lambda^{(p)})} \quad (10)$$

高阶累积量其独特的优点可以提取信号间的耦合特性和检测系统的非线性特性, 并且对高斯噪声不敏感, 可弃除外加干扰噪声的影响。

2.2 变分模态分解

变分模态分解^[23]是 2014 年提出的一种自适应信号处理新方法, 将输入信号 f 分解为多个模态函数 $u_k(t)$, 并使得每个模态的估计带宽之和最小, 则约束变分问题如式(11)所示。

$$\begin{cases} \min_{\{u_k\}, \{\omega_k\}} \left\{ \sum_k \left\| \delta_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \right\} \\ \text{s.t.} \quad \sum_k u_k = f \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\{u_k\} := \{u_1, \dots, u_k\}$ 为各模态分量; $\{\omega_k\} := \{\omega_1, \dots, \omega_k\}$ 为各模态分量中心频率; $\delta(t)$ 为冲激函数。

为求得上述变分问题的最优解, 引入增广拉格朗日函数, 将约束性变分问题转化为非约束性变分问题, 如式(12)所示。

$$L(\{u_k\}, \{\omega_k\}, \lambda) := \alpha \sum_k \left\| \delta_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) \cdot u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 + \left\| f(t) - \sum_k u_k(t) \right\|_2^2 + \left\langle \lambda(t), f(t) - \sum_k u_k(t) \right\rangle \quad (12)$$

其中式(11)的最小值问题可以转化为式(12)中的鞍点问题, 利用交替方向乘子法的迭代次优化序列, 可以得到各个模态分量和其中心频率表达式。

$$\hat{u}_k^{n+1}(\omega) = \frac{\hat{f}(\omega) - \sum_{i \neq k} \hat{u}_i(\omega) + \frac{\hat{\lambda}(\omega)}{2}}{1 + 2\alpha(\omega - \omega_k)^2} \quad (13)$$

$$\omega_k^{n+1} = \frac{\int_0^\infty \omega |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega}{\int_0^\infty |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega} \quad (14)$$

式中: $\hat{u}_k^{n+1}(\omega)$ 为 $\hat{f}(\omega) - \sum_{i \neq k} \hat{u}_i(\omega)$ 的维纳滤波; ω_k^{n+1} 为模态功率谱的中心。利用傅里叶逆变换对 $\{\hat{u}_k(\omega)\}$

进行计算, 结果中的实部 $\{u_k(t)\}$ 即为所求。

3 变分模态分解的参数优化

根据接地故障的分析, 暂态接地电流由工频分量、衰减直流分量和暂态高频分量组成, 且直流分量与工频分量的频率差相对较小, 而高频分量与工频分量的频率差相对较大, 因此本文参考文献[16]“两步走”的分解方法, 先对信号进行 2 层分解, 再对分解结果中的 IMF1 进行 2 层分解, 获取直流分量 IMF1-1 和工频交流分量 IMF1-2, 最终实现对零序电流信号的 3 层分解。

3.1 混合蛙跳算法

变分模态分解中的二次罚因子 α 越小, 所得模态函数的带宽越大; 反之, α 越大, 所得模态函数的带宽越小, 所以 α 的选取显得尤为重要。本文利用蛙跳算法^[24-25]确定二次罚因子 α , 避免人为主观因素带来的影响, 其算法步骤如下:

1) 初始化群体及参数, 青蛙总数 N_{pop} , 族群 N_m , 每组青蛙个数 N_f , 全局迭代次数 M , 组内迭代次数 N_e , 随机初始化青蛙个体。

2) 计算每只青蛙的适应度值, 适应度值为

$$f_{\text{fitness}} = |c_{\text{fault}}| - |c_{\text{nonfault}}| \quad (15)$$

式中: c_{fault} 为故障线路的高阶累积量; c_{nonfault} 为非故障线路的高阶累积量。

3) 将 N_{pop} 只青蛙按照适应度值降序排列。适应度最好的青蛙为 p_g 。第 1 只青蛙分入第 1 个子群, 第 2 只青蛙分入第 2 个子群, 第 m 只青蛙分入第 N_m 个子群, 第 $m+1$ 只青蛙分入第 1 个子群, 第 $m+2$ 只青蛙分入第 2 个子群, 依次类推。

4) 确定每个子群中适应度值最好的和最差的个体 p_b, p_w 。按照指定的组内迭代次数, 每组青蛙按照更新策略改进最差解, 循环 N_e 次, 并更新每组中的最差个体, 更新策略为

$$D^j = r \times (p_b - p_w) \quad (16)$$

$$p_w' = p_w + D^j \quad (-D_{\text{max}} \leq D^j \leq D_{\text{max}}) \quad (17)$$

式中: $r \in U(0,1)$; $j=1,2,\dots,N_m$; D_{max} 表示青蛙的最大移动步长。经过更新后, 如果得到的青蛙 p_w' 的适应度值优于原来的青蛙 p_w , 则将其取代; 如果没有改进, 则用 p_g 取代 p_b 重新按照更新策略进行改进; 如果仍没有改进则随机产生一只新青蛙取代原来的 p_w 。

5) 将所有更新后的族群重新混合, 并重新执行步骤 3) 和步骤 4), 重复执行 M 次。

3.2 二次罚因子的确定

为使二次罚因子 α 更加精确, 能够不受过渡电阻和故障合闸角的影响, 使用 Matlab 建立如图 2 的小电流接地系统, 三相电压源为 220 kV; 变压器变比为 220/35, 连接方式为 Δ/Y ; 架空线路正序参数^[26]为: $R_1 = 0.170 \Omega/\text{km}$, $L_1 = 1.20 \text{ mH}/\text{km}$, $C_1 = 9.697 \text{ nF}/\text{km}$, 零序参数为: $R_0 = 0.230 \Omega/\text{km}$, $L_0 = 5.480 \text{ mH}/\text{km}$, $C_0 = 6 \text{ nF}/\text{km}$; 消弧线圈设置为过补偿 8%, 消弧线圈电阻约为感抗的 10%, 四条线路所带负载分别为 2 MVA、1.8 MVA、1.5 MVA、1.2 MVA, 系统采样频率 1 MHz。

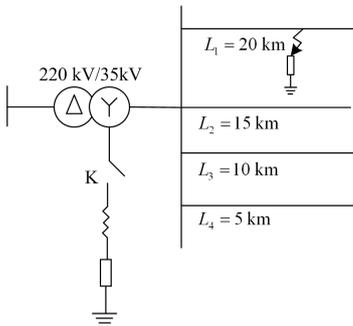


图 2 小电流接地系统仿真模型

Fig. 2 Simulation model of small current grounding system

若在 0.02 s 时, 线路 L_1 发生单相接地故障, 故障合闸角为 90° , 过渡电阻为 500Ω , 利用混合蛙跳算法对二次罚因子进行参数优化。混合蛙跳算法的参数设置如下: 族群为 5, 每个族群 5 只青蛙, 组内迭代次数为 10, 全局迭代次数为 10。适应度函数中的非故障线路高阶累积量, 取非故障线路中的最大值, 青蛙移动最大步长为 2 000。

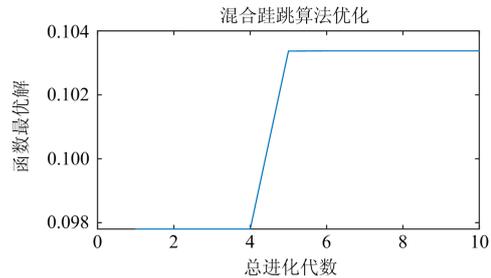


图 3 适应度值变化曲线

Fig. 3 Fitness value change curve

混合蛙跳算法的适应度值变化曲线如图 3 所示, 适应度函数最优值出现在第 5 代上, 所得二次罚因子优化值为 3314.42。为了使参数能够适应所有情况且足够精确, 本文分别取 12 组不同故障合闸角和过渡电阻对应的零序电流进行参数优化, 每组进行 5 次寻优并取平均值。每组经混合蛙跳算法得到的二次罚因子优化值见表 1 和表 2。

表 1 故障合闸角为 0° 和 30° 的优化数据

Table 1 Optimized data with fault closing angles of 0° and 30°

合闸角 0°	故障电阻/ Ω			合闸角 30°	故障电阻/ Ω		
	5	500	5 000		5	500	5 000
1	2714.233 6	2328.569 3	7839.077 9	1	2763.328 0	2750.845 4	3976.103 2
2	2889.081 8	2661.568 0	7926.561 8	2	2937.358 5	2750.912 9	5429.621 5
3	2836.397 3	3239.659 8	8547.646 3	3	2762.848 7	2752.373 7	3126.364 4
4	2195.173 0	2449.385 8	7797.613 1	4	2183.890 6	2758.846 4	3842.953 7
5	2605.403 3	3751.173 6	7777.532 3	5	3484.932 1	2758.399 6	3202.548 2
每组均值	2648.057 8	2886.071 3	7977.686 3	每组均值	2826.471 6	2754.275 6	3915.518 2

表 2 故障合闸角为 60° 和 90° 的优化数据

Table 2 Optimized data with fault closing angles of 60° and 90°

合闸角 60°	故障电阻/ Ω			合闸角 90°	故障电阻/ Ω		
	5	500	5 000		5	500	5 000
1	2177.100 6	2297.800 2	3403.533 7	1	2727.386 8	3316.418 3	7931.007 5
2	3800.970 4	2180.302 2	4264.183 5	2	2071.683 5	2840.780 8	8294.151 6
3	2280.676 3	2180.302 2	3363.437 5	3	2164.752 3	3083.776 8	7930.479 7
4	2396.438 3	2180.349 2	3189.878 0	4	3621.331 4	3316.147 3	8121.418 2
5	2085.928 3	2871.623 6	3554.015 6	5	2427.902 0	3415.271 6	7748.651 7
每组均值	2548.222 8	2342.075 5	3555.009 7	每组均值	2602.611 2	3194.479 0	8005.141 7

根据表 1 和表 2 不难看出, 5 000 Ω 高阻接地时的二次罚因子优化值较大, 低阻接地时相对较小, 可见高阻接地时对模态函数的带宽要求较高。为了使二次罚因子的选取合理, 本文利用熵值法^[27], 确定二次罚因子在过渡电阻为 5 Ω 、500 Ω 和 5 000 Ω 下的所占权重, 熵值函数表达式为

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m y_{ij} \ln y_{ij} \quad (18)$$

式中, $k=1/\ln(m)$, m 为每个指标的数量。熵值法是根据信息指标有序度的差异性来确定指标的权重, 信息指标差异程度越大, 表明信息熵越小, 指标权重越大。其信息指标权重函数为

$$w_j = \frac{h_j}{\sum_{j=1}^n h_j} \quad (19)$$

式中, $h_j=1-e_j$ 。根据表 1 和表 2 的优化均值确定三项指标的权重分别为 0.010 3、0.081 4 和 0.908 3, 最终得到的二次罚因子优化值为 5 580.54。

4 选线判据及相关理论

4.1 高阶累积量判据

根据故障电感电流和高阶累积量的分析, 结合仅故障线路含有电感电流这一特性, 利用高阶累积量值反映各线路衰减直流分量的大小, 高阶累积量值为

$$E_i = |c_{i3}| \quad (20)$$

式中, c_{i3} 为各出线衰减直流分量的三阶累积量, 高阶累积量值最大的线路为故障线路。

4.2 变异系数以及双重极性判据

当发生单相接地故障时, 故障线路与非故障线路的零序电流初始极性相反, 且故障线路的工频交流分量与非故障线路的工频交流分量极性相反, 根据这一特点, 本文利用变异系数实现对零序电流和工频交流分量的极性判断, 变异系数计算公式为

$$V = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (21)$$

式中: V 代表变异系数; σ 代表标准差; \bar{x} 代表算术平均数; 变异系数能够反映各单位标志值的差异程度或离散程度, 变异系数越小, 说明标志值离散程度越小, 总体各单位的差距也就越小。利用符号函数可得到双重极性判据为

$$p_i = \text{sgn}(V_{id}) \quad (22)$$

$$q_i = \text{sgn}(V_{imf1-2}) \quad (23)$$

式中: V_{id} 为零序电流的变异系数; V_{imf1-2} 为工频交流分量的变异系数。若各出线的零序电流极性唯一不同, 则为线路故障; 若各出线的零序电流极性相同, 则为母线故障; 若各出线的工频交流极性唯一不同, 则极性唯一不同的线路为待定故障线路, 若该故障线路与高阶累积量判定的线路相同, 则为最终故障线路。

上述三种故障选线判断依据, 避免了单一选线依据出现误判的弊端, 能有效、更加准确地判断出故障线路和母线故障, 经过大量实验证明, 上述三种选线依据不受过渡电阻和故障合闸角的影响。

4.3 选线步骤

1) 当母线零序电压 U_0 大于 0.15 母线额定电压 U_m 时, 启动选线装置, 同时记录各线路故障前后 1 个周期的零序电流。

2) 利用全周相减法计算零序电流的故障分量, 求解各线路零序电流故障分量的变异系数, 得到各线路相应的初始极性。

3) 若各线路的初始极性相同, 则判定为母线故障, 若各线路的初始极性唯一不同, 则判定线路故障。

4) 对故障后各线路的零序电流按照前文所述的分解方法进行变分模态分解, 得到各线路对应的衰减直流分量和工频交流分量, 对各线路的直流分量求解高阶累积量值, 对各线路的工频交流分量求解变异系数。

5) 如果工频交流分量的初始极性仅有唯一不同, 且极性唯一不同的线路与高阶累积量值最大的线路对应相同, 则该线路为最终故障线路。

选线流程见图 4。

5 仿真分析

5.1 故障位置变化分析

5.1.1 长线路故障分析

当单相接地故障发生在 20 km 的较长线路 1 上, 故障合闸角为 90°, 故障电阻为 500 Ω 时, 通过各线路检测装置, 可得到各线路的零序电流, 如图 5 所示, 从图 5 不难看出, 线路 1 与其他线路的极性相反。根据选线流程, 将各线路的零序电流进行变分模态分解, 可得衰减直流分量和工频交流分量, 各线路的 IMF 分量波形如图 6、图 7 所示。

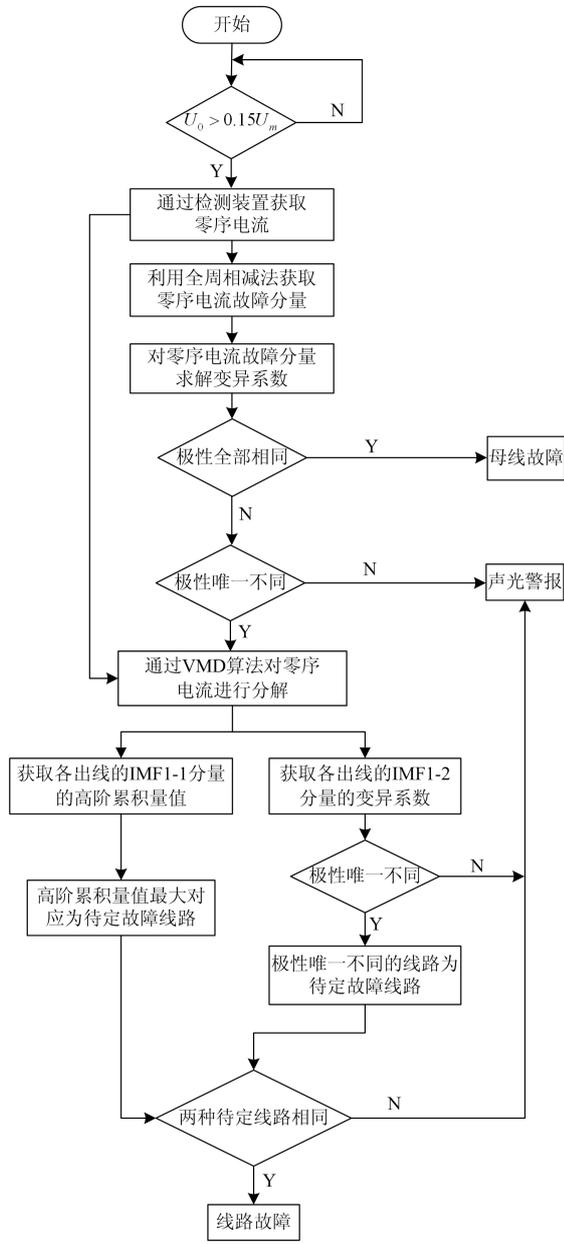


图 4 故障选线流程

Fig. 4 Fault line selection process

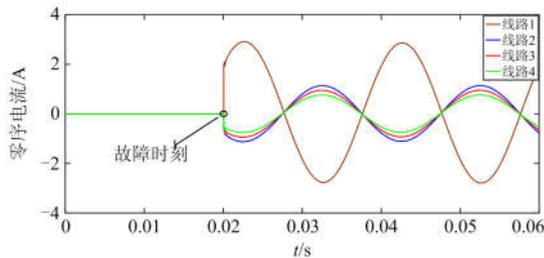


图 5 长线路故障零序电流

Fig. 5 Long line fault zero sequence current

从图 6 可以看出, 当故障合闸角为 90° 时, 各线路的衰减直流分量近似为 0, 但对比故障线路和非故障线路, 可以看出故障线路直流分量的非线性特征比非故障线路更加明显, 且从图 7 中可以明显看出线路 1 工频交流分量的初始极性唯一不同; 根据选线流程, 各线路的双重极性和高阶累积量的计算结果如表 3 所示。

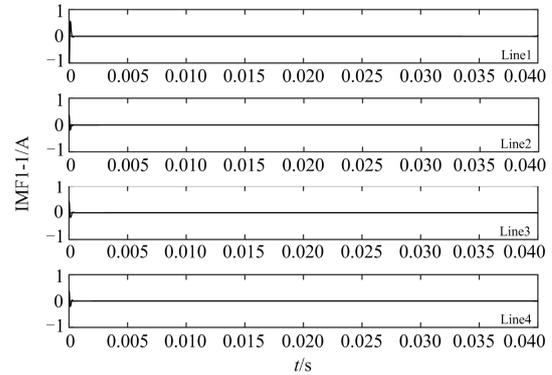


图 6 长线路故障 IMF-1 分量

Fig. 6 Long line fault IMF-1 component

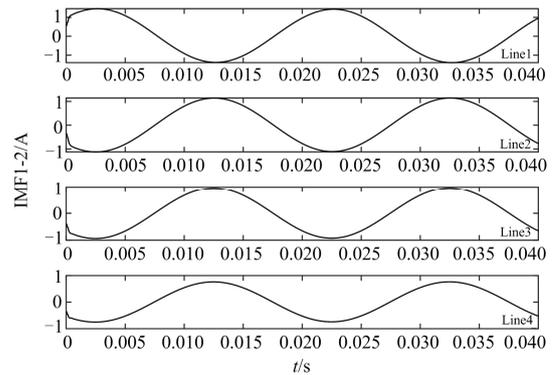


图 7 长线路故障 IMF-2 分量

Fig. 7 Long line fault IMF-2 component

表 3 长线路故障计算数据

Table 3 Long line fault calculation data

线路	l_1	l_2	l_3	l_4
V_{id}	0.366 1	-0.384 0	-0.365 5	-0.368 5
V_{imf1-2}	0.202 7	-0.261 4	-0.188 0	-0.151 1
E_{imf1-1}	0.009 9	3.0166e-04	4.5815e-04	2.6255e-04

从表 3 中的数据可以看出, 线路 1 的零序电流极性初始极性不同, 判断为线路故障; 又线路 1 的工频分量极性唯一不同, 且线路 1 的高阶累积量值最大, 故判断出线路 1 故障, 所得结论与结果和选线机制一致。而且从表 3 可以看出, 零序电流初始

极性唯一不同的线路也同为线路 1, 所以零序电流的初始极性也能够作为故障选线的依据之一。

5.1.2 短线路故障分析

当单相接地故障发生在 5 km 的较短线路 4 上, 故障合闸角为 0° , 过渡电阻为 100Ω 时, 根据上述选线方法, 利用检测到的零序电流, 其波形如图 8 所示, 将其进行变分模态分解, 得到各线路的衰减直流分量和工频交流分量, 其波形如图 9、图 10 所示。从图 8 可以看出故障线路 4 的极性唯一不同, 且从图 10 同样可以看出故障线路 4 的工频交流分量极性明显与其他线路不同。

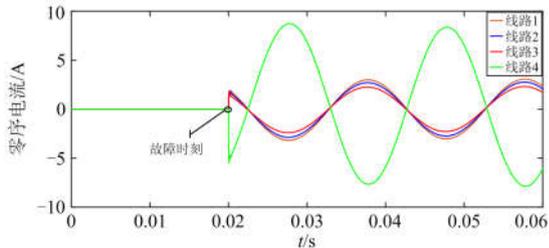


图 8 短线路故障零序电流

Fig. 8 Short line fault zero sequence current

从图 9 可以看出, 当故障合闸角为 0° 时, 各线路的衰减直流分量较大, 符合上述接地故障的暂态分析。图 9 中线路 4 的衰减直流分量最大幅值在 0.9 左右, 而其他非故障线路的衰减直流分量在 0.3 左右, 由此可以看出线路 4 衰减直流分量的非线性特征更为明显。根据计算方法, 得到各线路的双重极性和高阶累积量值如表 4 所示, 由表 4 可知, 线路 4 的高阶累积量值最大, 而且其双重极性都为负, 其他线路极性为正, 故可判断线路 4 为故障线路, 根据上述分析, 可以看出本文提出的选线方法对长短线路都同样适用。

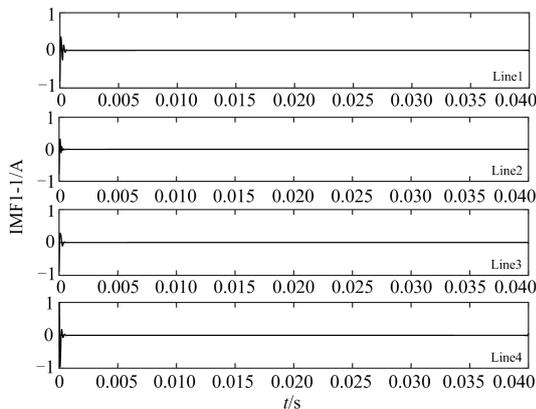


图 9 短线路故障 IMF1-1 分量

Fig. 9 Short line fault IMF1-1 component

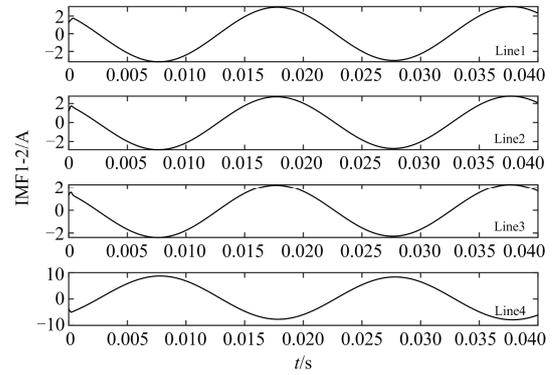


图 10 短线路故障 IMF1-2 分量

Fig. 10 Short line fault IMF1-2 component

表 4 短线路故障计算数据

Table 4 Short line fault calculation data

线路	l_1	l_2	l_3	l_4
V_{fd}	0.210 7	0.197 1	0.232 2	-0.193 3
V_{mf1-2}	0.089 2	0.084 7	0.084 8	-0.062 4
E_{mf1-1}	0.001 3	0.001 1	0.001 8	0.036 4

5.1.3 母线故障分析

若单相接地故障发生在母线处, 故障合闸角为 60° , 过渡电阻为 5Ω 。线路 1 至线路 4 的零序电流波形如图 11 所示, 从图 11 可以看出, 四条线路的初始极性相同。

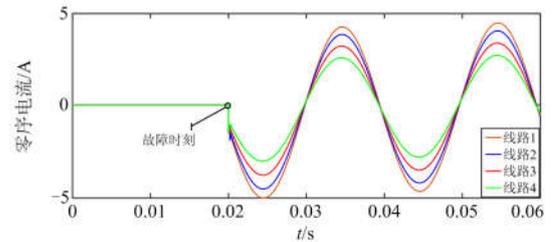


图 11 母线故障零序电流

Fig. 11 Bus fault zero sequence current

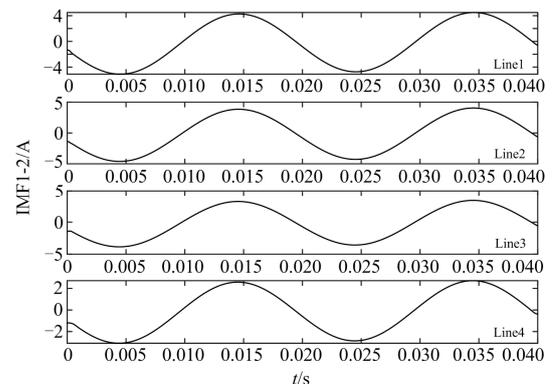


图 12 母线故障工频交流分量

Fig. 12 Bus fault frequency AC component

为更好地说明母线故障时，容性电流的极性问题，线路 1 至线路 4 的工频交流分量如图 12 所示。从图 12 可以看出四条线路的工频交流分量波形的初始值都为负值，四条线路初始极性相同，观测结果与仿真背景一致。各线路的零序电流变异系数和工频交流分量变异系数如表 5 所示，从表 5 中的数据可以看出各线路的零序电流初始极性相同，故可判断为母线故障。

表 5 母线故障双重极性

Table 5 Bus fault dual polarity

线路	I_1	I_2	I_3	I_4
V_{id}	-0.175 9	-0.124 5	-0.065 1	-0.106 4
V_{imf1-2}	-0.135 3	-0.096 2	-0.038 5	-0.084 9

5.2 优越性分析

为验证本文所提选线方法的优越性和正确性，本文将直流分量的高阶累积量与文献[16]中所述的固有模态能量进行比较。在故障合闸角为 90°时，故障线路直流分量的高阶累积量和模态能量数据如表 6 所示，表中非故障线路高阶累积量和模态能量取为最大值。从表 6 可以看出随着过渡电阻的增加，故障线路零序电流幅值逐渐减小，零序电流中直流分量的幅值也逐渐减小。对于高阶累积量值，随着零序电流幅值的减小，故障线路与非故障线路之间的差值在逐渐增大，在高阻接地时，数值相差两个量级，而对于直流分量的模态能量，不管是高阻接地还是低阻接地，故障线路与非故障线路之间的差值相对稳定，所以可以看出，虽然零序电流幅值较小时，导致高阶累积量值也对应很小，但是由

表 6 高阶累积量和模态能量对比数据

Table 6 High order cumulative and modal energy comparison data

故障电阻/ Ω		5	100	200	500	1 000	2 000	5 000
故障线路零序电流幅值		12.708	8.132 5	5.901 1	3.238 6	1.849 1	0.995 3	0.417 3
高阶累积量	故障线路	0.416 3	0.104 1	0.038 1	5.81e-03	1.02e-03	1.50e-04	1.00e-05
	非故障线路	0.012 3	0.003 3	0.001 3	1.88e-04	3.24e-05	4.57e-06	2.49e-07
模态能量	故障线路	0.731 1	0.733 9	0.740 3	0.7427	0.743 8	0.747 3	0.759 2
	非故障线路	0.08 90	0.093 5	0.093 6	0.0954	0.097 4	0.096 0	0.089 6

表 7 不同情况下工频交流分量变异系数

Table 7 Variation coefficient of power frequency AC component under different conditions

故障电阻/ Ω	合闸角/(°)	故障线路	I_1	I_2	I_3	I_4
5	0	线路 1	-0.175 7	0.208 5	0.155 3	0.143 6
100	0	线路 1	-0.172 5	0.232 1	0.152 9	0.128 9
200	30	线路 2	0.133 4	-0.159 1	0.190 4	0.255 3

于故障线路和非故障线路之间的差值较大，根据这一特点，能够确保选出故障线路，且对比可以看出，高阶累积量值在高阻接地时有着一定的优越性，零序电流幅值不会影响本文基于高阶累积量选线方法的正确性，而本文利用双重极性的双重保障，也大大提高了选线的正确性，极大的减小了误判的可能性。

5.3 变异系数适用性分析

为了说明变异系数不受故障合闸角和过渡电阻的影响，且能够准确判断出母线故障。在不同故障情况下，各线路的工频交流分量变异系数如表 5 所示，从表 5 可以看出，无论是高阻接地，还是低阻接地，无论是大角度线路故障，还是小角度线路故障，故障线路的工频交流分量初始极性都唯一不同，变异系数能够正确选择出故障线路。假设单相接地故障发生在母线处，不同故障合闸角和过渡电阻下的零序电流变异系数如表 6 所示，表 6 中数据显示每条线路的零序电流初始极性全部相同，每种情况下都能判断出母线故障。可见变异系数不受故障合闸角和过渡电阻的影响。

5.4 高阶累积量适用性分析

为了说明高阶累积量对过渡电阻和故障合闸角有较强的适用性，在不同故障情况下，各线路的高阶累积量值如表 7 所示，从表 7 中可以看出，过渡电阻越大其高阶累积量值越小，但每种情况下，都能够明显比较出故障线路的高阶累积量值最大。可见高阶累积量不受故障合闸角和过渡电阻的影响，有较强的适用性。

续表 7

故障电阻/ Ω	合闸角/ $^{\circ}$	故障线路	I_1	I_2	I_3	I_4
500	30	线路 2	0.125 7	-0.170 7	0.224 7	0.277 9
1 000	60	线路 3	-0.266 4	-0.245 4	0.218 2	-0.138 1
2 000	60	线路 3	-0.266 4	-0.244 9	0.217 8	-0.143 3
5 000	90	线路 4	-0.157 3	-0.128 9	-0.091 9	0.115 2

表 8 不同情况下母线故障时零序电流变异系数

Table 8 Zero-sequence current variation coefficient of bus fault under different conditions

故障电阻/ Ω	合闸角/ $^{\circ}$	I_1	I_2	I_3	I_4
5	0	0.152 6	0.132 9	0.196 9	0.290 8
100	0	0.123 9	0.105 7	0.170 6	0.254 6
200	30	0.280 4	0.336 6	0.474 2	0.594 6
500	30	0.257 1	0.317 0	0.453 2	0.567 1
1 000	60	-0.190 0	-0.150 1	-0.087 5	-0.064 9
2 000	60	-0.192 2	-0.153 2	-0.090 8	-0.064 3
5 000	90	-0.139 8	-0.098 7	-0.066 8	-0.100 6

表 9 不同情况下直流分量高阶累积量值

Table 9 Higher order cumulant values of DC components under different conditions

故障电阻/ Ω	合闸角/ $^{\circ}$	故障线路	I_1	I_2	I_3	I_4
5	0	线路 1	2.8788e-01	1.3405e-02	1.2617e-02	7.0230e-03
100	0	线路 1	8.3560e-02	2.9180e-03	3.7930e-03	2.2140e-03
200	30	线路 2	2.0700e-05	7.1107e-04	3.3949e-05	2.1330e-05
500	30	线路 2	3.4915e-06	1.1688e-04	4.9446e-06	3.1766e-06
1 000	60	线路 3	2.7405e-06	2.2473e-06	7.6505e-05	2.3422e-06
2 000	60	线路 3	3.6592e-07	2.9922e-07	1.0750e-05	2.7643e-07
5 000	90	线路 4	1.4200e-07	1.1797e-07	1.0420e-07	3.7808e-06

6 结论

本文提出了一种基于变异系数与高阶累积量的小电流接地故障选线方法,该方法通过双重变异系数和高阶累积量的三种判据判定故障线路,能够可靠的判断出母线故障和线路故障。多种故障情况的仿真结果表明:

1) 混合蛙跳算法能够对 VMD 算法中的二次罚因子起到一定的优化作用,且熵值法使二次罚因子的选取更加合理,经 VMD 算法得到的衰减直流分量和工频交流分量能够作为故障选线的特征量。

2) 变异系数不受故障合闸角和过渡电阻的影响,能够准确判断出母线故障和线路故障,相较于传统的母线故障判定方法构造相关系数矩阵,具有较高的稳定性,操作简单。

3) 高阶累积量有着较强的适应性,能够准确反映出信号的非线性特征,能够不受故障合闸角和过渡电阻的影响,且对于高阻接地故障有一定的优越

性,其与变异系数共同作为选线依据,确保了选线方法的可靠性和准确性。

参考文献

- [1] 郭清滔, 吴田. 小电流接地系统故障选线方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(2): 146-152.
GUO Qingtao, WU Tian. Survey of the methods to select fault line in neutral point ineffectively grounded power system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(2): 146-152.
- [2] 樊淑娟, 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.

- [3] 高志鹏, 张慧芬, 孙旭娜. 注入半波直流的小电流接地故障选线定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 139-145.
GAO Zhipeng, ZHANG Huifen, SUN Xuna. A method of fault line selection and fault point location with half-wave DC injection in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 139-145.
- [4] 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.
- [5] 王朋, 田翠华, 陈柏超, 等. 基于新型磁控消弧线圈的电磁混合消弧及配合选线新方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(16): 175-183.
WANG Peng, TIAN Cuihua, CHEN Baichao, et al. Electromagnetic hybrid arc suppression and a novel method of feeder selection based on the novel magnetic controlled Petersen coil[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 175-183.
- [6] 张乃刚, 张加胜, 郑长明, 等. 基于零序电流幅值分布相似性的小电流接地故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(13): 120-125.
ZHANG Naigang, ZHANG Jiasheng, ZHENG Changming, et al. Fault section location based on similarity of zero sequence current amplitude distribution in non-solidly-earthed network[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(13): 120-125.
- [7] 陈豪威, 王媛媛, 唐夏菲, 等. 基于 S 变换暂态能量与方向的无整定配电网选线新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 71-78.
CHEN Haowei, WANG Yuanyuan, TANG Xiafei, et al. A new fault line selection method for distribution network system based on transient energy and direction of S-transformation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 71-78.
- [8] 张钧, 何正友, 贾勇. 基于 S 变换的故障选线新方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 31(10): 109-115.
ZHANG Jun, HE Zhengyou, JIA Yong. Fault line identification approach based on S-transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 31(10): 109-115.
- [9] HUANG N E, WU Z H. A review on Hilbert-Huang transform: method and its applications to geophysical studies[J]. Reviews of Geophysics, 2008, 46(2): 2006-2028.
- [10] 刘谋海, 方涛, 姜运, 等. 基于高频分量相关度分析的故障选线方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(2): 101-106.
LIU Mouhai, FANG Tao, JIANG Yun, et al. Fault line selection method based on correlation analysis of high-frequency components[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2017, 29(2): 101-106.
- [11] 王晓卫, 魏向向, 高杰, 等. 基于 EEMD 与 SVM 的配电网故障选线方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(12): 55-61.
WANG Xiaowei, WEI Xiangxiang, GAO Jie, et al. A novel fault line selection method based on EEMD-Hilbert and SVM for distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2014, 26(12): 55-61.
- [12] 张新慧. 基于 Prony 算法的小电流接地故障暂态选线技术[D]. 济南: 山东大学, 2008.
ZHANG Xinhui. Transient faulty feeder selection techniques for non-effectively earthed network based on Prony algorithm[D]. Jinan: Shandong University, 2008.
- [13] FENG Zhiping, CHEN Xiaowang, LIANG Ming. Iterative generalized synchrosqueezing transform for fault diagnosis of wind turbine planetary gearbox under nonstationary conditions[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2015, 52-53(1): 360-375.
- [14] 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-solidly-earthed network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(5): 70-75.
- [15] ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, BO Zhiqian. New development in relay protection for smart grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 121-127. DOI: 10.1186/s41601-016-0025-x.
- [16] 卫永琴, 鞠凯, 王潇龙, 等. 变分模态分解在小电流接地系统故障选线中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(11): 31-38.
WEI Yongqin, JU Kai, WANG Xiaolong, et al. Application of variational mode decomposition in fault line selection for small-current grounding system[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2019, 31(11): 31-38.
- [17] 汤吉鸿, 朱军飞, 李勇, 等. 基于变分模态分解的电力系统泛频带振荡辨识方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(2): 1-8.
TANG Jihong, ZHU Junfei, LI Yong, et al. VMD based mode identification for broad-band oscillation in power

- system[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(2): 1-8.
- [18] YE H J R, SHIEH J S, HUANG N E. Complementary ensemble empirical mode decomposition: a novel noise enhanced data analysis method[J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2010, 2(2): 135-156.
- [19] TORRES M E, COLOMINAS M A, SCHLOTTHAUER G, et al. A complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise[C] // IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, ICASSP 2011, May 22-27, 2011, Prague, Czech Republic: 4144-4147.
- [20] 朱先贤, 赵帅, 贾宏杰. 基于高阶累积量的改进 Prony 低频振荡辨识方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(9): 1-8.
ZHU Xianxian, ZHAO Shuai, JIA Hongjie. Improved Prony method based on higher-order cumulant for low frequency oscillation detection[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2017, 29(9): 1-8.
- [21] 赵静, 何正友, 贾勇, 等. 基于高阶累积量的暂态电能质量扰动分类研究[J]. 电网技术, 2011, 35(5): 103-109.
ZHAO Jing, HE Zhengyou, JIA Yong, et al. Classification of transient power quality disturbances based on high-order cumulants[J]. Power System Technology, 2011, 35(5): 103-109.
- [22] 张贤达. 时间序列分析—高阶统计量方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994.
- [23] DRAGOMIRETSKIY K, ZOSSO D. Variational mode decomposition[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(3): 531-544.
- [24] 张沈习, 陈楷, 龙禹, 等. 基于混合蛙跳算法的分布式风电源规划[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(13): 76-82.
ZHANG Shenxi, CHEN Kai, LONG Yu, et al. Distributed wind generator planning based on shuffled frog leapfrog algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(13): 76-82.
- [25] 杨冬婧, 雷德明. 新型蛙跳算法求解总能耗约束 FJSP[J]. 中国机械工程, 2018, 29(22): 2682-2689.
YANG Dongjing, LEI Deming. A novel shuffled frog-leaping algorithm for FJSP with total energy consumption constraints[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(22): 2682-2689.
- [26] 张新慧, 薛永端, 潘贞存, 等. 单相接地故障零模暂态特征的仿真分析[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(12): 39-43.
ZHANG Xinhui, XUE Yongduan, PAN Zhencun, et al. Simulative analysis of zero modal transient characteristics for single-phase grounding fault[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(12): 39-43.
- [27] 杨家莉, 徐永海. 基于组合赋权与 TOPSIS 模型的节点电压暂降严重程度综合评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(18): 88-95.
YANG Jiali, XU Yonghai. Comprehensive evaluation method of node voltage sag severity based on TOPSIS model and combination weights[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(18): 87-95.

收稿日期: 2019-07-19; 修回日期: 2019-10-24

作者简介:

曾志辉(1978—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为信号处理、大功率开关电源技术、储能技术。E-mail: zzh@hpu.edu.cn

(编辑 姜新丽)