

# 基于高阶多分辨率奇异熵的高压输电线路故障选相

范新桥, 朱永利

(华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206)

**摘要:** 将高阶多分辨率奇异熵用于挖掘输电线路故障特征, 提出了一种利用电流故障分量的高阶多分辨率奇异熵值进行故障选相的方法, 该方法基本不受故障类型、故障位置、过渡电阻和系统摆开角的影响。故障选相过程中, 对电流故障分量数据进行小波变换, 计算不同尺度下小波变换系数的高阶累积量, 并对以高阶累积量为元素的状态矩阵进行奇异值分解, 最后计算出奇异值的信息熵, 通过比较熵值与设定阈值的大小关系即可判断出故障相别。通过与基于故障电流分量奇异熵值的选相结果和基于全相故障电流高阶多分辨率奇异熵值的选相结果进行比较, 表明所提选相方法的效果较好。

**关键词:** 输电线路; 故障选相; 电流故障分量; 高阶多分辨率奇异熵; 短路故障

**中图分类号:** TM 711

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-6047(2011)04-0050-05

## 0 引言

故障选相是保护正确动作的基础, 也是进行输电线路故障定位的重要环节。尤其随着智能电网<sup>[1]</sup>的发展, 快速可靠的故障选相对实现输电线路故障处理的智能化有着极其重要的意义。

故障分量含有丰富的故障信息, 在故障检测方面比全相电气量更具优势<sup>[2]</sup>。文献[3]中利用小波变换表征电流故障分量的暂态能量大小来判别故障相, 提出了实用的故障选相算法。同时, 信息熵作为对系统不确定程度的描述, 能够有效提取信源特征, 结合信息熵的故障检测在电力系统中的应用也在逐渐增多。文献[4]对小波能谱熵、小波时间熵和小波奇异熵在电力系统故障检测中的应用进行研究, 并通过仿真分析表明小波熵在电力系统故障检测领域中具有较好的应用前景。文献[5]对各相全相故障电压信号进行小波变换, 并对小波系数进行奇异值分解, 最后通过判断奇异熵值的大小实现了故障选相。由于高压远距离输电线路在故障过程中产生的故障分量表现出很强的非平稳性, 与基于二阶统计的奇异谱分析方法相比, 高阶多分辨率奇异谱<sup>[6-7]</sup>的噪声抑制能力较强, 包含了更多的信息, 更适合于非平稳信号的分析。

在此基础上, 为寻求一种新的输电线路故障选相方案, 本文尝试将电流故障分量的高阶多分辨率奇异熵应用于高压输电线路故障选相中。最后, 通过对不同故障类型进行仿真计算, 验证了该选相方法不受故障类型、故障位置、系统摆开角和过渡电阻的影响。并通过与利用电流故障分量奇异熵进行选相的选相结果和利用全相故障电流的高阶多分辨率奇异熵值进

行选相的选相结果比较, 说明了该选相方法的有效性和可行性。

## 1 高阶多分辨率奇异熵

奇异谱分析方法是基于二阶统计的方法, 反映的是信号在时间上和空间上的一种线性相关关系, 难以精确反映非线性系统内在的非线性关系<sup>[7]</sup>。而高阶统计量研究的是非高斯过程和非线性系统, 具有更广泛的适用性和更好的稳定性<sup>[8]</sup>。下面对高阶累积量进行简单介绍。

设  $x$  为随机变量, 其第一特征函数的定义如式(1)所示:

$$\phi(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) e^{j\omega x} dx = E[e^{j\omega x}] \quad (1)$$

$x$  的第二特征函数的定义如式(2)所示:

$$\psi(\omega) = \ln \phi(\omega) \quad (2)$$

式(3)中, 定义  $m_k$  为  $x$  的  $k$  阶矩:

$$m_k = E[x^k] = \int_{-\infty}^{+\infty} x^k f(x) dx \quad (3)$$

若  $m_k (k=1, 2, \dots, n)$  存在, 则  $m_k$  与  $x$  的第一特征函数按泰勒级数展开后的  $k$  阶导数的关系如式(4)所示, 即为高阶矩的定义式。

$$m_k = (-j)^k \frac{d^k \phi(\omega)}{d\omega^k} \Big|_{\omega=0} = (-j)^k \phi^{(k)}(0) \quad k \leq n \quad (4)$$

设  $c_k$  为  $x$  的  $k$  阶累积量, 则  $c_k$  与  $x$  的第二特征函数按泰勒级数展开后的  $k$  阶导数的关系如式(5)所示。

$$c_k = (-j)^k \frac{d^k \psi(\omega)}{d\omega^k} \Big|_{\omega=0} = (-j)^k \psi^{(k)}(0) \quad k \leq n \quad (5)$$

一阶累积量表示信号的均值, 二阶累积量函数为协方差函数, 三阶和四阶累积量函数分别如式(6)(7)所示, 其中  $\tau_1$ 、 $\tau_2$  和  $\tau_3$  为时延值,  $m$  为嵌入维数。

$$c_3(\tau_1, \tau_2) = m_3(\tau_1, \tau_2) - m_1[m_2(\tau_1) + m_2(\tau_2) + m_2(\tau_1 - \tau_2)] + 2m_1^3 \quad (6)$$

收稿日期: 2010-06-21; 修回日期: 2011-01-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60974125)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(60974125)

$$\begin{aligned}
c_4(\tau_1, \tau_2, \tau_3) = & m_4(\tau_1, \tau_2, \tau_3) - m_2(\tau_1)m_2(\tau_3 - \tau_2) - \\
& m_2(\tau_2)m_2(\tau_3 - \tau_1) - m_2(\tau_3) \times \\
& m_2(\tau_1 - \tau_2) - m_1[m_3(\tau_2 - \tau_1, \tau_3 - \tau_1) + \\
& m_3(\tau_2, \tau_3) + m_3(\tau_1, \tau_3) + m_3(\tau_1, \tau_2)] + \\
& m_1^2[m_2(\tau_1) + m_2(\tau_2) + m_2(\tau_3) + \\
& m_2(\tau_3 - \tau_1) + m_2(\tau_3 - \tau_2) + \\
& m_2(\tau_2 - \tau_1)] - 6m_1^4 \quad (7)
\end{aligned}$$

由于高阶累积量一方面对高斯过程具有不敏感性,理论上可以完全抑制噪声的影响,另一方面在数学形式上便于分析,实际中以四阶累积量用得最多。为使四阶累积量矩阵适合奇异谱分析,最常规的方法是进行切片,即使  $\tau_2 = \tau_3$ 。由式(7)可构造出用于奇异谱分析的矩阵  $\mathbf{A}$ , 矩阵元素  $A_{ij}$  如式(8)所示。

$$A_{ij} = c_4(i, j, j) \quad i, j = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

对  $\mathbf{A}$  进行奇异值分解 SVD (Singular Value Decomposition)<sup>[9-10]</sup> 即可得到高阶奇异值。SVD 的基本过程是如果  $\mathbf{A}$  为  $m \times n$  阶实矩阵, 则存在  $m$  阶正交矩阵  $\mathbf{P}$  和  $n$  阶正交矩阵  $\mathbf{Q}$  使得  $\mathbf{A} = \mathbf{PDQ}^H$  成立, 则  $\mathbf{D}$  为矩阵  $\mathbf{A}$  的奇异特征值矩阵。其中  $\mathbf{D} = \text{diag}(d_1, d_2, \dots, d_r)$ ,  $d_i > 0 (i = 1, 2, \dots, r)$ ,  $r$  是矩阵  $\mathbf{A}$  的秩, 即  $r = \text{rank}(\mathbf{A})$ 。

奇异谱分析可以增强信号的信噪比, 锐化信号的奇异性。多分辨率奇异谱分析是在传统的奇异谱分析的基础上融合了多分辨率的思想, 而高阶多分辨率奇异谱分析是在多分辨率奇异谱分析的基础上, 基于高阶累积量分析, 以高阶累积量作为矩阵  $\mathbf{A}$  的元素而进行的分析。它能够充分体现出信号的内在信息, 提高了对信号形式变化的适应性以及对嵌入维数变化的稳定性。

同时, 信息熵作为一种对信号或系统状态不确定性程度进行定量评价的有效指标<sup>[11-12]</sup>, 能够有效提取信源特征。信息熵是信源整体统计特征平均不确定性的量度, 在数学上可描述为

$$s(p) = -\sum_{i=1}^N p_i \ln p_i \quad (9)$$

其中,  $p(p_1, p_2, \dots, p_N)$  为一不确定的概率分布,  $s(p)$  为该分布所具有的信息熵。信息熵的大小可以用来描述概率系统的平均不确定程度, 即如果某一系统的不确定性最大, 那么其就会有最大的熵值。基于信息熵理论, 利用高阶奇异值即可构造出高阶多分辨率奇异熵。

## 2 选相流程与仿真计算

### 2.1 选相流程

电流故障分量与全相故障电流相比更具优势, 它是从故障后 1~2 个周期内的电流中减去短路前的负荷电流分量得到的。线路发生故障时, 相当于去掉两侧电源并在故障点增加一故障附加电源, 故障分量只与此故障附加电源和故障点两侧线路参数有关<sup>[13-14]</sup>,

从理论上消除了负荷电流的影响。高压远距离输电线路在故障过程中产生的电流故障分量, 包括非周期分量、高频分量和低频分量, 会使电流波形发生严重畸变, 而且在理论上相异故障类型致使故障相和非故障相的电流复杂度也各不相同。本文运用高阶多分辨率奇异熵挖掘这些差异, 以实现正确的故障选相。

高阶多分辨率奇异熵的主要计算过程是对电流故障分量数据进行小波变换<sup>[15-16]</sup>, 然后计算不同尺度下小波变换系数的高阶累积量, 得到以高阶累积量为矩阵元素的状态矩阵并进行奇异值分解, 最后计算奇异值的信息熵, 即可得到用以进行故障选相的高阶多分辨率奇异熵。当输电线路发生故障时, 故障相和非故障相的电流故障分量特征发生不同的变化, 从而导致累积量矩阵所构成的空间发生变化, 致使奇异值变化, 进而熵值也发生变化。理论上, 通过熵值的大小即可区分出不同故障类型。为了进一步锐化这种差异, 采用文献[5]中的预处理方法对各奇异值熵做比值并进行累计, 所不同的是当用电流故障分量的高阶多分辨率奇异熵计算时, 首个奇异值也在一定程度上反映了电流故障分量的奇异性, 也要参与其中的运算。这里以  $\Delta e_a$ 、 $\Delta e_b$  和  $\Delta e_c$  分别表示各相的累计熵值, 以  $\text{HMRSE}_a(n)$ 、 $\text{HMRSE}_b(n)$  和  $\text{HMRSE}_c(n)$  分别代表各相第  $n$  个奇异值的高阶多分辨率奇异熵, 它们的关系分别如式(10)~(12)所示。

$$\Delta e_a = \sum_{n=1}^k \frac{\text{HMRSE}_a(n)}{\text{HMRSE}_b(n)} + \frac{\text{HMRSE}_a(n)}{\text{HMRSE}_c(n)} \quad (10)$$

$$\Delta e_b = \sum_{n=1}^k \frac{\text{HMRSE}_b(n)}{\text{HMRSE}_c(n)} + \frac{\text{HMRSE}_b(n)}{\text{HMRSE}_a(n)} \quad (11)$$

$$\Delta e_c = \sum_{n=1}^k \frac{\text{HMRSE}_c(n)}{\text{HMRSE}_a(n)} + \frac{\text{HMRSE}_c(n)}{\text{HMRSE}_b(n)} \quad (12)$$

其中,  $k$  为所取有效奇异值的个数。通过判断  $\Delta e_a$ 、 $\Delta e_b$  和  $\Delta e_c$  与选相阈值  $\varepsilon$  的大小关系即可实现故障选相, 具体选相流程如图 1 所示。

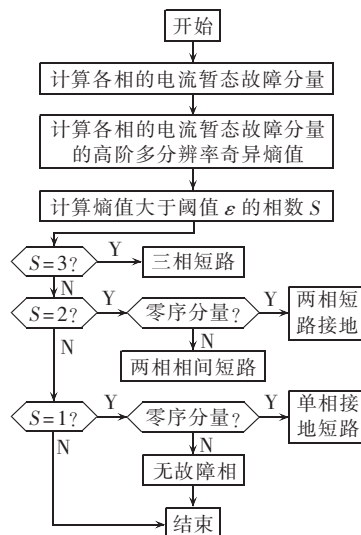


图 1 故障选相处理流程图

Fig.1 Flowchart of faulty phase selection

需要说明的是,如果用熵值判断是否属于接地故障会使问题变得非常繁琐,简单而且有效的方法是通过对判断有无零序分量来判断是否属于接地故障。因此,本文选相方法中是利用故障后的三相全相故障电流数据,通过凯伦贝尔变换计算得出是否存在零序电流分量来判断接地故障的。

2.2 仿真计算

计算模型如图 2 所示,系统为一线路全长 300 km 的 500 kV 双端电源高压输电系统。短路电流数据由仿真软件 PSCAD 仿真得到,采样频率取 20 kHz,为了获得精确的短路电流数据,线路模型采用频率相关模型。工频下,输电线路的正序参数和零序参数分别为: $r_1=0.034\ 68\ \Omega/\text{km}$ , $x_1=0.423\ 4\ \Omega/\text{km}$ , $g_1=1.000\times 10^{-7}\ \text{S}/\text{km}$ , $b_1=2.726\times 10^{-6}\ \text{S}/\text{km}$ ; $r_0=0.300\ 0\ \Omega/\text{km}$ , $x_0=1.142\ 6\ \Omega/\text{km}$ , $g_0=1.000\times 10^{-7}\ \text{S}/\text{km}$ , $b_0=1.936\times 10^{-6}\ \text{S}/\text{km}$ 。短路点分别设在距 M 端 0 km(始端)、150 km(中间)和 300 km(末端)处,系统摆开角分为 20°、50° 和 70° 3 种情况,每种情况又包括过渡电阻分别为 50  $\Omega$ 、100  $\Omega$ 、200  $\Omega$  和 300  $\Omega$  4 种情况。对各种情况的短路电流数据进行计算,用故障后 1/2 个周期的电流故障分量的短路数据通过流程图 1 进行选相。这里选用 db4 小波基,分解尺度为 10。

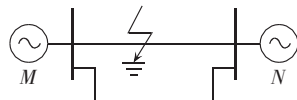


图 2 高压输电线路模型

Fig.2 Simplified model of high-voltage transmission line

表 1 列出了不同短路类型、不同短路位置、系统摆开角为 70° 及过渡电阻为 300  $\Omega$  的短路条件较为恶劣情况的故障选相结果。其中,FT 代表高压输电线路实际短路类型,D 代表故障距离, $\delta$  表示系统角差,R 表示过渡电阻, $\Delta e'_A$ 、 $\Delta e'_B$  和  $\Delta e'_C$  分别为 A 相、B 相和 C 相电流故障分量的奇异熵值, $\Delta e_A$ 、 $\Delta e_B$  和  $\Delta e_C$  分别为 A 相、B 相和 C 相电流故障分量的高阶多分辨率奇异熵, $e_A$ 、 $e_B$  和  $e_C$  分别为 A 相、B 相和 C 相全相故障电流的高阶多分辨率奇异熵。Res0 代表利用电流故障分量的奇异熵进行故障选相的选相结果,Res1 和 Res2 分别表示用电流故障分量和用全相故障电流的高阶多分辨率奇异熵进行故障选相的选相结果。选相结果中由粗体标出的为错选相的情况。

经过大量测试发现,利用电流故障分量的高阶多分辨率奇异熵进行选相时,选相阈值的选取一般是通过三相短路情况进行仿真,取三相短路情况最小熵值的约 70 % 即可,这里设定选相阈值  $\varepsilon=20$ 。

表 1  $\delta=70^\circ$ 、 $R=300\ \Omega$  时不同故障条件下的奇异熵值和高阶多分辨率奇异熵值及选相结果

Tab.1 Singular entropy,high order multi-resolution singular entropy and faulty phase selection result for different fault conditions, $\delta=70^\circ$  and  $R=300\ \Omega$

| FT       | D/km | $\Delta e'_A$ | $\Delta e'_B$ | $\Delta e'_C$ | $\Delta e_A$ | $\Delta e_B$ | $\Delta e_C$ | $e_A$     | $e_B$    | $e_C$     | Res0        | Res1 | Res2        |
|----------|------|---------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|-----------|----------|-----------|-------------|------|-------------|
| Ag       | 0    | 365.460 6     | 17.303 7      | 16.526 3      | 546.813 5    | 10.337 2     | 11.516 5     | 25.967 1  | 17.556 3 | 60.371 2  | Ag          | Ag   | <b>CAg</b>  |
| Ag       | 150  | 181.927 6     | 19.001 8      | 18.532 0      | 245.315 0    | 16.588 4     | 10.824 4     | 25.185 3  | 18.474 1 | 30.602 0  | Ag          | Ag   | <b>CAg</b>  |
| Ag       | 300  | 99.536 9      | 20.332 8      | 18.365 2      | 155.750 1    | 15.264 7     | 13.766 1     | 29.143 7  | 18.450 0 | 20.117 4  | <b>B</b> Ag | Ag   | <b>CAg</b>  |
| Bg       | 0    | 16.869 6      | 457.478 4     | 17.968 8      | 14.013 3     | 651.585 9    | 9.287 4      | 20.842 2  | 27.698 4 | 19.150 6  | Bg          | Bg   | <b>ABg</b>  |
| Bg       | 150  | 18.117 0      | 113.354 3     | 19.631 0      | 13.254 8     | 265.216 6    | 13.434 2     | 21.895 7  | 21.321 6 | 22.082 9  | Bg          | Bg   | <b>ABCg</b> |
| Bg       | 300  | 19.101 5      | 86.936 4      | 18.846 5      | 16.279 0     | 150.408 4    | 13.556 6     | 19.701 8  | 25.752 8 | 19.867 0  | Bg          | Bg   | Bg          |
| Cg       | 0    | 18.067 1      | 16.368 5      | 337.480 5     | 9.314 7      | 14.317 2     | 514.284 8    | 28.211 7  | 23.482 8 | 31.129 5  | Cg          | Cg   | <b>ABCg</b> |
| Cg       | 150  | 17.554 1      | 19.732 5      | 98.536 0      | 9.883 6      | 15.515 2     | 228.017 0    | 31.049 3  | 17.941 4 | 29.613 9  | Cg          | Cg   | <b>CAg</b>  |
| Cg       | 300  | 19.246 0      | 19.313 9      | 65.057 1      | 14.108 2     | 16.905 3     | 142.913 3    | 37.714 8  | 15.240 0 | 43.035 7  | Cg          | Cg   | <b>CAg</b>  |
| ABg      | 0    | 86.080 3      | 220.231 6     | 15.129 7      | 149.089 8    | 345.490 6    | 4.063 1      | 14.685 1  | 38.328 6 | 27.015 0  | ABg         | ABg  | <b>BCg</b>  |
| ABg      | 150  | 99.653 2      | 78.051 4      | 17.259 2      | 152.146 9    | 199.972 3    | 5.060 7      | 20.728 6  | 22.559 1 | 20.818 2  | ABg         | ABg  | <b>ABCg</b> |
| ABg      | 300  | 78.454 2      | 106.134 0     | 16.051 8      | 164.558 9    | 149.910 3    | 2.084 1      | 33.659 1  | 34.484 6 | 13.075 2  | ABg         | ABg  | ABg         |
| BCg      | 0    | 19.355 7      | 665.033 5     | 492.913 3     | 0.208 4      | 1 300.828 5  | 1 066.105 9  | 21.477 5  | 46.461 4 | 41.892 5  | BCg         | BCg  | <b>ABCg</b> |
| BCg      | 150  | 18.122 5      | 60.420 6      | 78.030 1      | 7.664 6      | 151.977 6    | 127.234 0    | 23.035 5  | 22.917 7 | 20.079 0  | BCg         | BCg  | <b>ABCg</b> |
| BCg      | 300  | 19.762 4      | 65.415 1      | 58.364 6      | 17.967 0     | 82.711 6     | 63.804 3     | 22.473 5  | 23.136 5 | 18.499 2  | BCg         | BCg  | <b>ABg</b>  |
| CAG      | 0    | 101.839 7     | 17.862 5      | 110.321 7     | 115.169 3    | 6.190 7      | 226.162 8    | 19.085 0  | 28.748 3 | 38.072 9  | CAG         | CAG  | <b>BCg</b>  |
| CAG      | 150  | 75.206 2      | 16.557 6      | 60.482 5      | 102.651 8    | 18.200 7     | 76.294 2     | 20.898 1  | 25.500 1 | 22.154 3  | CAG         | CAG  | <b>ABCg</b> |
| CAG      | 300  | 61.798 7      | 19.234 1      | 59.513 4      | 82.577 4     | 10.894 4     | 71.780 3     | 27.851 2  | 18.451 0 | 21.209 2  | CAG         | CAG  | CAG         |
| AB       | 0    | 501.068 9     | 438.753 5     | 16.793 3      | 2 646.759 6  | 2 669.659 9  | 0.048 4      | 21.816 2  | 39.012 1 | 18.186 1  | AB          | AB   | AB          |
| AB       | 150  | 126.035 1     | 81.371 1      | 17.668 3      | 319.859 7    | 306.767 7    | 0.131 8      | 25.211 9  | 24.160 5 | 19.155 8  | AB          | AB   | AB          |
| AB       | 300  | 323.041 6     | 829.367 5     | 14.668 3      | 894.498 6    | 2 509.409 2  | 0.847 4      | 42.339 4  | 45.014 7 | 11.617 6  | AB          | AB   | AB          |
| BC       | 0    | 19.895 6      | 176.832 3     | 518.863 5     | 0.055 8      | 5 492.597 7  | 5 581.449 7  | 18.740 6  | 44.439 2 | 62.526 9  | BC          | BC   | BC          |
| BC       | 150  | 17.102 6      | 237.532 1     | 186.489 0     | 0.228 0      | 625.184 7    | 613.371 2    | 22.981 8  | 22.646 2 | 29.663 2  | BC          | BC   | <b>ABC</b>  |
| BC       | 300  | 219.478 1     | 96.052 0      | 213.650 9     | 1.923 7      | 824.421 0    | 903.732 4    | 18.308 9  | 27.667 8 | 32.090 7  | BC          | BC   | BC          |
| CA       | 0    | 572.991 5     | 18.490 9      | 391.107 5     | 25 122.883 2 | 0.089 0      | 25 051.002 6 | 234.709 7 | 26.711 0 | 194.830 3 | CA          | CA   | <b>ABC</b>  |
| CA       | 150  | 283.945 4     | 16.124 3      | 162.669 8     | 1 762.377 7  | 0.282 4      | 1 764.105 5  | 43.909 1  | 18.341 0 | 50.373 9  | CA          | CA   | CA          |
| CA       | 300  | 231.658 2     | 18.641 9      | 427.140 1     | 18 243.061 7 | 1.539 7      | 19 566.093 8 | 263.718 4 | 14.212 6 | 313.835 4 | CA          | CA   | CA          |
| ABC/ABCg | 0    | 30.697 7      | 50.574 0      | 51.681 0      | 55.637 5     | 99.777 4     | 80.7837      | 56.302 1  | 76.798 3 | 71.816 3  | ABC         | ABC  | ABC         |
| ABC/ABCg | 150  | 29.188 3      | 26.092 1      | 30.431 9      | 40.592 6     | 31.665 4     | 35.5250      | 20.406 3  | 25.115 8 | 29.364 1  | ABC         | ABC  | ABC         |
| ABC/ABCg | 300  | 35.541 1      | 37.615 2      | 49.638 1      | 64.811 5     | 50.867 0     | 55.5992      | 31.680 9  | 30.196 9 | 33.063 1  | ABC         | ABC  | ABC         |

表1中,利用电流故障分量高阶多分辨率奇异熵值的选相结果都是正确的,利用电流故障分量奇异熵值的选相结果也都基本正确,而利用全相故障电流高阶多分辨率奇异熵值的选相结果中选错相情况较多。从计算结果中可以看到以下几点。

**a.** 利用电流故障分量的奇异熵进行选相的结果除个别选相错误外,其他基本都是正确的。如果在一定程度上增大选相阈值,利用电流故障分量的奇异熵也能够正确选相,但是与电流故障分量的高阶多分辨率奇异熵值相比,其阈值的设定裕度要小很多。换言之,故障相和非故障相的电流故障分量高阶多分辨率奇异熵值的差异比其奇异熵值的差异要大,因此利用电流故障分量的高阶多分辨率奇异熵值更容易区分故障相和非故障相。

**b.** 三相短路情况下,高阶多分辨率奇异熵值的分布相对比较平均,其他短路情况相比较小。线路位置、系统摆开角和过渡电阻对各相电流故障分量的高阶多分辨率奇异熵值影响不是太大,无论是利用电流故障分量的高阶多分辨率奇异熵值,还是利用全相故障电流的高阶多分辨率奇异熵值都可以实现正确选相。

**c.** 除三相短路外,其他短路情况下,故障相和非故障相的电流故障分量的高阶多分辨率奇异熵值相差比较大,尤其在两相相间短路情况下最为悬殊。这种情况对正确选相是有利的,它可以使选相阈值的选取有更大的裕度,即使再将阈值增大到一定程度也能保证选相结果的正确性。

**d.** 从表1中由粗体标出的错选相的情况可以看出,利用故障相和非故障相的全相故障电流高阶多分辨率奇异熵值有时难以区分故障情况,错选相较为严重。在过渡电阻和系统摆开角较小时近距离故障情况下基本可以正确选出故障相,而随着过渡电阻、系统摆开角和故障距离的增大,利用全相故障电流的高阶多分辨率奇异熵值进行选相的错选情况愈加明显。

可以看出,电流故障分量的高阶多分辨率奇异熵更能有效挖掘并在很大程度上锐化故障相和非故障相之间的差异,相比之下电流故障分量的奇异熵值的区分效果稍差,而全相故障电流的高阶多分辨率奇异熵在某种程度上根本无法有效表达故障特征,致使选相结果出现错误。因此,电流故障分量的高阶多分辨率奇异熵的选相效果较好,这也与前面的理论分析是相符的。

### 3 结论

本文提出将基于电流故障分量的高阶多分辨率奇异熵应用于高压输电线路的故障选相,为实现输电线路快速可靠的故障处理提供了一种新的故障选相方案,并通过大量的仿真计算验证了其有效性和可行性,得出以下几点主要结论。

**a.** 基于高阶多分辨率的奇异熵故障选相方法只需要使用一个阈值就可以准确判断出故障相别,使问题变得更加简单和实用。同时,经过大量的仿真验证了本文选相方法基本不受故障类型、故障位置、系统摆开角和过渡电阻的影响,具有一定的应用前景。

**b.** 利用电流故障分量的奇异熵进行选相时,如阈值设定不当容易导致选相错误。与之相比,基于电流故障分量高阶多分辨率奇异熵的故障选相阈值设定裕度要大很多。总体而言,基于高阶多分辨率奇异熵的故障选相效果要优于基于奇异熵的故障选相方法。

**c.** 故障相和非故障相的高阶多分辨率奇异熵值差异明显,使选相阈值的设定具有较大的选择裕度,但在不同情况下为获得最优阈值仍需要进一步的研究。

### 参考文献:

- [1] 肖世杰. 构建中国智能电网技术思考[J]. 电力系统自动化,2009,33(9):1-4.  
XIAO Shijie. Consideration of technology for constructing Chinese smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009,33(9):1-4.
- [2] 林湘宁,刘沛. 全电流与故障分量电流比例差动判据的比较研究[J]. 中国电机工程学报,2004,24(10):27-31.  
LIN Xiangning,LIU Pei. Comparative studies on percentage differential criteria using phase current and superimposed phase current[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(10):27-31.
- [3] 段建东,张保会,周艺,等. 基于暂态量的超高压输电线路故障选相[J]. 中国电机工程学报,2006,26(3):1-6.  
DUAN Jiandong,ZHANG Baohui,ZHOU Yi,et al. Transient-based faulty phase selection in EHV transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(3):1-6.
- [4] 何正友,蔡玉梅,钱清泉. 小波熵理论及其在电力系统故障检测中的应用研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(5):38-43.  
HE Zhengyou,CAI Yumei,QIAN Qingquan. A study of wavelet entropy theory and its application in electric power system fault detection[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(5):38-43.
- [5] 何正友,符玲,麦瑞坤,等. 小波奇异熵及其在高压输电线路故障选相中的应用[J]. 中国电机工程学报,2007,27(1):31-36.  
HE Zhengyou,FU Ling,MAI Ruikun,et al. Study on wavelet singular entropy and its application to faulty phase selection in HV transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(1):31-36.
- [6] 谢平,刘彬,林洪彬,等. 多分辨率奇异谱熵及其在振动信号监测中的应用研究[J]. 传感技术学报,2004(4):547-550.  
XIE Ping,LIU Bin,LIN Hongbin,et al. Study on multi-resolution singular-spectrum entropy and its usage in vibration signal monitoring[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators,2004(4):547-550.
- [7] 袁坚,肖先赐. 非线性时间序列的高阶奇异谱分析[J]. 物理学报,1998,47(6):897-905.  
YUAN Jian,XIAO Xianci. Higher-order singular-spectrum analysis of nonlinear time series[J]. Acta Physica Sinica,1998,47(6):897-905.
- [8] 张贤达. 现代信号处理[M]. 2版. 北京:清华大学出版社,2002:263-281.
- [9] 梁霖,徐光华,刘弹,等. 小波-奇异值分解在异步电机转子故障特征提取中的应用[J]. 中国电机工程学报,2005,25(19):111-115.  
LIANG Lin,XU Guanghua,LIU Dan,et al. A feature extraction method of rotor faults of induction motor based on continuous

- wavelet transform and singular value decomposition[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(19): 111-115.
- [10] 徐志向, 侯世英, 周林, 等. 基于奇异值分解的电力系统谐波状态估计[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(11): 28-31.
- XU Zhixiang, HOU Shiyang, ZHOU Lin, et al. Power system harmonic state estimation based on singular value decomposition[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(11): 28-31.
- [11] 潘明清, 周晓军, 杨辰龙, 等. 基于信息谱熵的支持向量机机械状态识别[J]. 传感技术学报, 2005, 18(2): 277-280.
- PAN Mingqing, ZHOU Xiaojun, YANG Chenlong, et al. Application of support vector machine based on information spectrum entropy in machine state identification[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2005, 18(2): 277-280.
- [12] 谢平, 杜义浩, 黄双峰. 基于信息熵的复杂机械系统非线性特征提取方法研究[J]. 振动与冲击, 2008, 27(7): 135-137.
- XIE Ping, DU Yihao, HUANG Shuangfeng. Research on non-linear feature extraction method of complex mechanical system based on information entropy[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(7): 135-137.
- [13] 刘万顺. 电力系统故障分析[M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 1998: 177-190.
- [14] 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.
- XU Songxiao, HE Jiali, LI Yongli, et al. Research on segregated current phase differential protection for UHV transmission lines[J]. Relay, 2007, 35(3): 1-5.
- [15] 魏明国. 实用小波分析[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2005: 1-70.
- [16] 胡国胜, 任震, 黄雯莹. 小波变换在电力系统中的应用研究[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(3): 71-78.
- HU Guosheng, REN Zhen, HUANG Wenying. Application of wavelet transform to electric power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(3): 71-78.

(编辑: 李 玲)

#### 作者简介:

范新桥(1982-), 男, 河北邢台人, 博士研究生, 研究方向为输电线路故障诊断和电力系统运行、分析与控制(E-mail: fxq8226@163.com);

朱永利(1963-), 男, 河北冀州人, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为人工智能在电力系统中的应用和电力系统运行、分析与控制(E-mail: yonglipw@heinfo.net)。

## Faulty phase selection based on high-order multi-resolution singular entropy for high-voltage transmission lines

FAN Xinqiao, ZHU Yongli

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** A faulty phase selection method based on the high-order multi-resolution singular entropy of full-phase fault current is presented for the transmission lines, which is not affected by the fault type, fault location, transition resistance and system angular difference. The wavelet transform is applied to the fault current components to compute the high-order cumulants with the wavelet coefficients of different scales, which are used to form the state matrix. The singular values can be then obtained by applying singular value decomposition to it and their high-order multi-resolution information entropies are calculated, which are used to select the faulty phase by comparing them with the threshold set. The comparison of faulty phase selection results between the method based on the singular entropy of fault current component and that based on the high-order multi-resolution singular entropy of full-phase fault current show the later is better.

**Key words:** transmission line; faulty phase selection; fault current component; high-order multi-resolution singular entropy; short-circuit fault