DOI: 10.7667/PSPC180428

基于现场实录波形的小电流接地故障暂态选线研究

邱 进[1,2]，田 野[1,3]，李冠华[3]，杨 帆[4]，张 鑫[4]，牟龙华[4]

(1. 中国电力科学研究院有限公司，湖北 武汉 430074；2. 电网环境保护国家重点实验室，湖北 武汉 430074；
3. 国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院，辽宁 沈阳 110006；4. 同济大学电气工程系，上海 201804)

摘要：为解决小电流接地系统单相接地故障特征不明显的问题，借助小波理论提出了基于 DS 证据理论的融合判据。首先确定小波基及小波分解尺度，并构造小波能量矩阵以确定故障特征频带。进而，在此特征频带下提取出三种故障特征：小波能量比、小波重构系数方差及暂态功率方向，并分析对比了三种特征的灵敏性。考虑到各个故障选线特征的检测灵敏性不同，为了提高选线准确率，进一步提出了基于 DS 证据理论的选线融合判据。最后，对现场实录波形进行分析。分析结果表明，该融合判据能够有机融合三种选线特征，提升选线正确率，具有较好的工程应用价值。

关键词：接地故障；小电流接地系统；小波分析；故障特征；DS 证据理论

Study on transient line selection of small current grounding fault based on field recorded waveform

QIU Jin[1,2], TIAN Ye[1,3], LI Guanhua[3], YANG Fan[4], ZHANG Xin[4], MU Longhua[4]

(1. China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China; 2. State Key Laboratory of Power Grid Environmental Protection, Wuhan 430074, China; 3. Research Institute of Liaoning Electric Power Co. Ltd., Shenyang 110006, China; 4. Department of Electrical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: In order to solve the problem of single-phase ground fault characteristics of small current grounding system, the fusion criterion based on DS evidence theory is proposed by wavelet theory. Firstly, the wavelet base and wavelet decomposition scale are determined, and the wavelet energy matrix is constructed to determine the fault characteristic frequency band. Further, three fault characteristics, including wavelet energy ratio, wavelet reconstruction coefficient variance and transient power direction, are extracted in this characteristic frequency band, and the sensitivity of them is analyzed. Considering the different detection sensitivity of each fault line selection feature, the line selection fusion criterion based on DS evidence theory is further proposed in order to improve the line selection accuracy. Finally, the on-site recorded waveform is analyzed. The analysis results show that the fusion criterion can organically integrate three line selection features, improve the line selection accuracy, and has better engineering application value.

This work is supported by Science and Technology Project of the Headquarter of State Grid Corporation of China (No. GY71-17-032).

Key words: ground fault; neutral indirectly grounding system; wavelet analysis; fault characteristic; DS evidence theory

0 引言

我国配电网故障形态庞大、演变过程复杂，尤其是接地故障特征受中性点接地方式、系统电气参数、过渡电阻等多重因素影响，弧光接地、故障并发等特定场景下还存在故障演变、模型耦合等特殊情况；因此需要从系统形态、故障形态等不同方面获取大量的故障基础数据，提取较高可信度的故障特征信息[1-3]。

早期研究人员普遍使用基于工频稳态量分析的选线方法，该方法基于故障馈线零序电流幅值等于非故障馈线零序电流幅值之和且极性相反的原理，但在消弧线圈接地系统中该方法不再适用[4]。

单相接地故障所产生的零序电流暂态量具有幅值大、不受消弧线圈影响的特点。近年来，基于故

基金项目：国家电网公司总部科技项目资助(GY71-17-032)“配电网复杂故障特征库及自适应辨识关键技术研究”

障暂态信号分析的选线方法得到研究人员的广泛关注[5-7]。其中，小波分析由于其在分析暂态信号和非平稳信号时所具有的优越性，获得了广泛使用[8]。文献[9-10]以小波能量作为特征，根据相电压峰值和过零点附近故障时小波高频、低频能量的不同，解决了相电压过零点附近故障时选线不准确的问题。此外，很多研究将小波分析与其他分析方法相结合，如经典模态分析、混沌振子、遗传算法、大数据分析、模式分类器等[11-16]，构造出更加复杂的选线特征。虽然以上文献从多个角度给出了小电流单相接地故障的故障线路特征，并解决了特殊情况下故障特征难以提取的问题，但以上方法所使用的故障暂态量均来自于电磁仿真模型，缺乏对实际现场数据的验证，无法应对实际配电网中复杂的系统形态与故障形态。

为了解决上述问题，本文提出了一种基于现场实录波形的多特征融合选线方案，融合方案采用 DS 证据理论，利用小波变换提取的多故障特征作为证据体。首先通过对故障发生后各线路录波数据进行小波分解与重构，构造出小波能量矩阵以得到小波能量集中的特征频带；进而结合大量现场录波数据提取了三种能够表征配电网单相接地故障的零序电流暂态特征：小波能量比、小波重构系数方差、暂态功率方向，并分析对比了这三种特征对金属性接地、高阻接地和间歇性弧光接地三类典型单相接地故障的灵敏性。结果表明，三种特征一定程度上均能实现接地选线，但对于高阻接地故障，单一判据存在选线特征不明显的问题。最后，引入 DS 证据理论建立选线融合判据，该判据有机地融合了三种选线特征，提高了选线准确性，具有较好的工程应用价值。

1　小波能量及故障特征频带的选取

1.1 小波能量

离散信号经 j 层小波分解后得到的小波高频细节系数记作 $d_j(m)$，低频近似系数为 $a_j(m)$，其中 m 为采样点，j 为小波尺度。对分解后的小波系数进行单支重构得到信号分量集合 $D_j(k)$、$A_j(k)$，则原始信号序列 $f(t)$可用信号分量集合进行表示，即

$$f(t)=\sum_{j=1}^{N}D_j(k)+A_S(k) \tag{1}$$

式中：$D_j(k)$表示各尺度的高频细节分量；$A_S(k)$ 表示最大尺度分解后的低频细节分量。

根据 Parseval 定理可知，对于正交小波基，原始信号的能量和展开系数的能量存在等价关系。对应第 j 尺度高频信号能量 E_{hj} 和最大尺度分解后的低频信号能量 E_{lS} 分别为

$$E_{hj}=\sum_{m=1}^{N}|D_j(m)|^2 \tag{2}$$

$$E_{lS}=\sum_{m=1}^{N}|A_S(m)|^2 \tag{3}$$

式中：N 为采样点数；S 为小波分解最大尺度。

以某变电站的一次接地故障为例进行分析，截取各线路故障发生前 1/4 周期和故障发生后 3/4 周期的零序电流波形如图 1 所示。

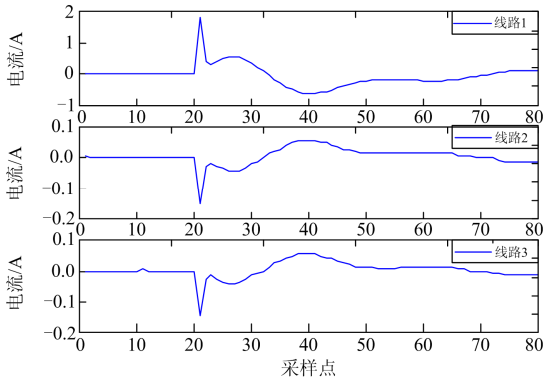

图 1 单相接地故障各线路零序电流波形

Fig. 1 Zero-sequence current waveform of each feeder when single-phase ground fault

采用 db4 小波对图 1 信号做小波分解，并对各尺度进行单支重构，利用式(2)、式(3)得到小波各尺度频谱能量如图 2 所示。由图 2 可得以下结论：

1) 故障线路零序电流在各尺度下的小波能量均远大于非故障线路，且变化幅度与陡度也明显较大；

2) 同一线路暂态零序电流各尺度小波能量差异较大。

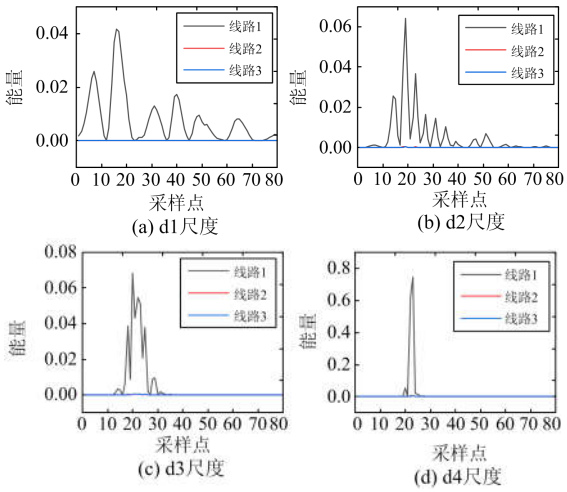

图 2 各线路暂态零序电流 d1—d4 尺度小波能量

Fig. 2 d1—d4 scale wavelet energy of zero-sequence current on each feeder

1.2 故障特征频带的选取

设配电网由线路1,…,n 构成，利用 db4 小波[17-19]对各线路发生故障后的暂态零序电流分量进行小波分解，考虑本文所分析的暂态零序信号的采样频率为 4 096 Hz，因此最理想的分解层数为 4 层[20]，此时小波细节系数 d1—d4 所包含的频域范围分别为 1 024~2 048 Hz、512~1 024 Hz、256~512 Hz、128~256 Hz。

对信号进行小波分解与重构，并将每条线路各尺度下高频能量 E_{i_hj} 构建成小波能量矩阵 $\boldsymbol{E}_{\text{sys}}$。

$$\boldsymbol{E}_{\text{sys}}=\begin{bmatrix} E_{1_h1} & E_{1_h2} & E_{1_h3} & E_{1_h4} \\ E_{2_h1} & E_{2_h2} & E_{2_h3} & E_{2_h4} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ E_{n_h1} & E_{n_h2} & E_{n_h3} & E_{n_h4} \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中，矩阵中行元素代表各线路尺度 1 至尺度 4 小波高频能量，列元素代表同一尺度下各线路的小波高频能量。

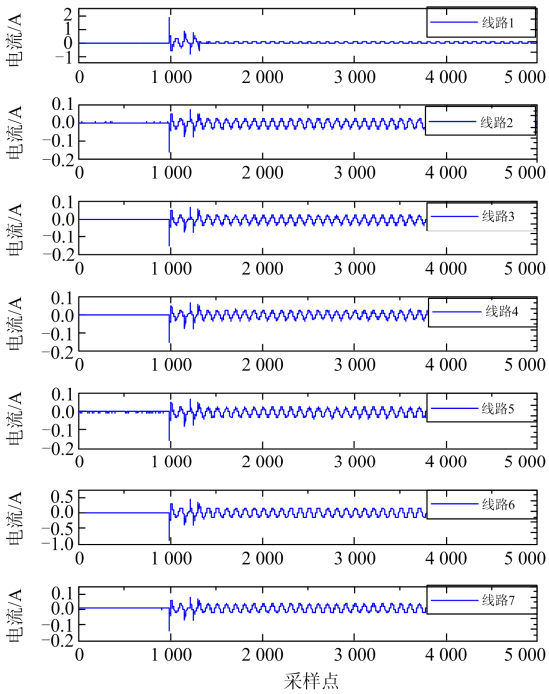

图 3 某变电站故障录波波形

Fig. 3 Fault recording waveforms of a substation

故障时零序分量的频率成分复杂，同时易受故障工况、系统参数等因素的影响，因此各线路的特征频带可能不同。为解决这一问题，本文将故障特征频带的选取分两种情况讨论。

1) 各线路小波能量最大值出现在同一尺度 c，则选择尺度 c 对应的频带作为故障特征频带。

2) 当各线路小波能量最大值不出现在同一频带，即各线路特征频带不同时，为保证精度，选择小波能量矩阵 $\boldsymbol{E}_{\text{sys}}$ 中列元素之和最大的列所在尺度 c 对应的频带作为故障特征频带。

上述故障特征频带的选取方法，可以根据实时计算结果动态调节，具备自适应性。

图 3 为某次单相接地故障后各馈线零序电流的故障录波，根据式(4)构造的故障小波能量矩阵如式(5)所示。

$$\boldsymbol{E}_{\text{sys}}=\begin{bmatrix} 2.7326 & 3.1406 & 1.3029 & 8.5034 \\ 1.282 & 0.8629 & 0.6489 & 2.3799 \\ 1.5276 & 0.9683 & 0.8961 & 2.7959 \\ 1.7364 & 1.1251 & 0.7882 & 2.2928 \\ 1.2484 & 0.8885 & 0.7752 & 2.2561 \\ 0.6409 & 0.4886 & 0.3802 & 1.99 \\ 1.2204 & 0.8737 & 0.5728 & 1.8145 \end{bmatrix} \tag{5}$$

由小波能量矩阵式(5)可知，各线路小波能量最大值均出现在第 4 尺度，因此选定尺度 4 对应的频带 128~256 Hz 为故障特征频带。

2 基于小波分析的单相接地故障特征

计及小波能量、变化幅度等标量特性，并结合暂态零序分量的矢量特性，即暂态零序电压和暂态零序电流的相位关系，本文拟从小波能量比、方差、功率方向这 3 个角度建立小电流接地系统单相接地故障特征。

2.1 小波能量比特征

为了消除量纲，本文采用选线尺度高频能量与最大尺度分解后的低频能量比 ρ_{ic} 作为故障特征。

$$\rho_{ic}=E_{i_hc}/E_{i_lS} \tag{6}$$

式中：i 为线路编号；c 为选线尺度；E_{i_hc} 为第 i 条线路对应选线尺度 c 的高频能量；E_{i_lS} 为第 i 条线路在最大尺度 S 分解后的低频能量。

以图 3 的现场录波数据为例，可得该故障时各线路小波能量比如表 1 所示。由表 1 可知，线路 1 的 ρ_{14} 最大，根据该特征可推测，线路 1 发生单相接地故障，该结果与现场 SOE 事件报告结果一致。

表 1 小波能量比

Table 1 Wavelet energy ratio

ρ_{14}	ρ_{24}	ρ_{34}	ρ_{44}	ρ_{54}	ρ_{64}	ρ_{74}
0.068 7	0.013 8	0.012 1	0.016 3	0.013 5	0.014	0.011 2

2.2 小波重构系数方差特征

小波能量比表征的是故障发生后零序电流暂态分量能量积累的特征。由于单相接地故障时零序电流中包含暂态突变量，为了从多种故障形态上描述

故障特征，本文采用小波重构系数方差来表征单相接地故障后零序电流暂态突变过程。方差是衡量源数据和期望值之差的度量值，小波重构系数方差反映选线尺度下小波重构系数的波动程度，可表示为

$$D(d_c)=\frac{1}{N}\sum_{m=1}^{N}(d_c(m)-\bar{d}_c)^2 \tag{7}$$

式中：N 代表采样点数；$d_c(m)$ 为选线尺度 c 下的离散小波重构系数；$\bar{d}_c$ 为 $d_c(m)$ 的平均值。

由于选线尺度间接体现接地故障的故障特征频段，且理论上发生故障后故障线路的零序电流幅值最大，因此该尺度下小波重构系数的方差也应具有较大的数值。

对图 3 所示的现场录波数据进行小波方差分析，其结果如图 4 所示。由图 4 可知，线路 1 的选线尺度 4 的方差明显大于其他线路，选为故障线路，该判断结果与现场 SOE 事件报告结果吻合。

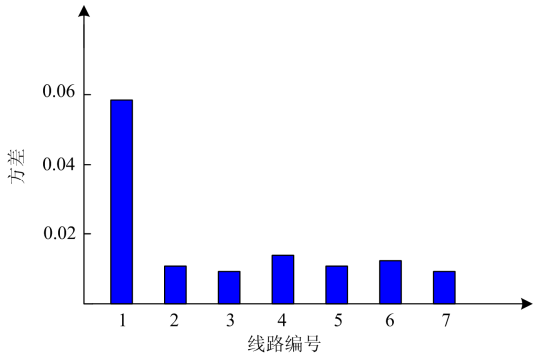

图 4 各线路 d4 小波重构系数的方差

Fig. 4 Variance of d4 wavelet reconstruction coefficients

2.3 暂态功率方向特征

由于暂态信号具有连续频谱，无法用传统的比较电压和电流相位关系的办法判断功率方向，因此本文采用基于小波系数的暂态功率方向法进行功率方向特征提取。暂态零序电压 $u_0(t)$与故障线路零序电流 $i_{f0}(t)$ 间为感性约束关系，故 $\mathrm{d}u_0(t)/\mathrm{d}t$ 与 $i_{f0}(t)$ 方向呈反极性；相应地，暂态零序电压 $u_0(t)$与健全线路零序电流 $i_0(t)$ 呈容性约束关系，$\mathrm{d}u_0(t)/\mathrm{d}t$ 与 $i_0(t)$ 方向呈同极性。根据 1.2 节中选取的选线尺度 c，可得零序电流暂态分量在该尺度下的小波系数记作 $d_{\mathrm{I}c}$；对零序电压暂态分量在该尺度下的小波系数求导记作 $d_{\mathrm{V}c}$。定义线路 i 在尺度 c 下零序电流暂态分量与零序电压暂态分量的暂态功率方向系数为

$$W_i=\frac{1}{N}\sum_{m=1}^{N}d_{\mathrm{I}c}(m)d_{\mathrm{V}c}(m) \tag{8}$$

式中，N 代表采样点数。

当 $W_i>0$ 时，则判断线路 i 为健全线路；当 $W_i<0$ 时，则判断线路 i 为故障线路。若所有线路的系数 W_i 都小于零，则判断为母线故障。

对图 3 所示的现场录波数据进行暂态功率方向分析，结果如表 2 所示。由表 2 可知，只有线路 1 的暂态功率方向系数为负，可推测线路 1 发生单相接地故障，与现场 SOE 事件报告结果吻合。

表 2 各线路方向系数

Table 2 Direction coefficients of each feeder

W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	W_6	W_7
−235.449	19.114	18.017	18.209	18.723	113.266	18.338

3 故障特征灵敏性分析

3.1 基于故障实录波形的故障特征验证

对某变电站 2017 年发生的三起典型故障进行分析，三起故障中都有三条出线向主站上传了故障录波，下面对三起故障进行故障特征验证。

a) 金属性接地

3 条线路的零序电流波形如图 5 所示，由图 5 可见，各线路零序电流暂态特征明显，线路 1—线路 3 的最大零序电流分别为 50.6 A、91.6 A 和 239.6 A，现场 SOE 报告显示线路 3 发生单相接地故障。

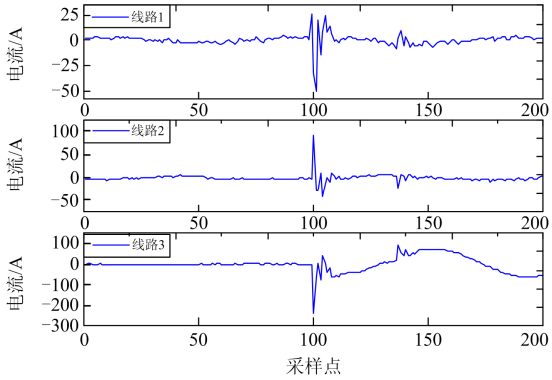

图 5 金属性接地故障各线路零序电流

Fig. 5 Zero-sequence current of metallic ground fault

采用 db4 小波对故障数据进行尺度 4 小波分解，并根据式(6)构建小波能量矩阵，如式(9)所示。

$$\boldsymbol{E}_{\mathrm{sys}}=\begin{bmatrix}0.5226 & 0.4347 & 0.1970 & 0.2533\\ 1.5620 & 0.8238 & 0.4537 & 0.1904\\ 28.2189 & 24.0176 & 6.4644 & 2.7996\end{bmatrix} \tag{9}$$

可见，尺度 1 小波能量最大，因此选择尺度 1 对应的频带 1 024~2 048 Hz 作为故障特征频带。

利用式(6)—式(8)提取各线路的三种故障特征值，结果如表 3 所示。

表 3 金属性接地故障各线路特征值

Table 3 Line characteristics of metallic ground fault

线路编号	1	2	3
小波能量比	0.005 6	0.016 1	0.721 7
小波重构系数方差	2.342 1	3.973 8	43.935 7
暂态功率方向	81.69	47.87	−38.80

b) 高阻接地

3 条线路的零序电流波形如图 6 所示，图中各线路零序电流暂态特征相比金属性接地不明显，线路 1—线路 3 的最大零序电流分别为 4.6 A、6.2 A 和 7.9 A，现场 SOE 报告显示线路 1 发生单相接地故障。

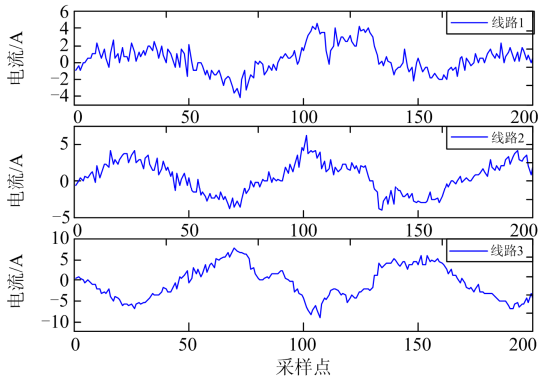

图 6 高阻接地故障各线路零序电流

Fig. 6 Zero-sequence current of high-resistance ground fault

采用 db4 小波对故障数据进行尺度 4 小波分解，并构建小波能量矩阵如式(10)所示。

$$\boldsymbol{E}_{\text{sys}}=\begin{bmatrix}9.6346 & 4.5987 & 3.6314 & 2.7845\\ 5.1808 & 2.8016 & 1.9515 & 2.0432\\ 1.3439 & 0.7474 & 0.8349 & 1.0881\end{bmatrix} \tag{10}$$

可见，尺度 1 小波能量最大，因此选择尺度 1 对应的频带 1 024~2 048 Hz 作为故障特征频带。

利用式(6)—式(8)提取各线路的三种故障特征值，结果如表 4 所示。

表 4 高阻接地故障各线路特征值

Table 4 Line characteristics of high-resistance ground fault

线路编号	1	2	3
小波能量比	0.121 4	0.058 9	0.056 0
小波重构系数方差	0.221 4	0.198 2	0.209 9
暂态功率方向	−55.668	−31.509	63.873

c) 间歇性弧光接地

3 条线路的零序电流波形如图 7 所示，各线路均弧光放电 4 次，线路 1—线路 3 的最大弧光接地电流分别为 35 A、37 A 和 232 A，现场 SOE 报告显示线路 3 发生单相接地故障。

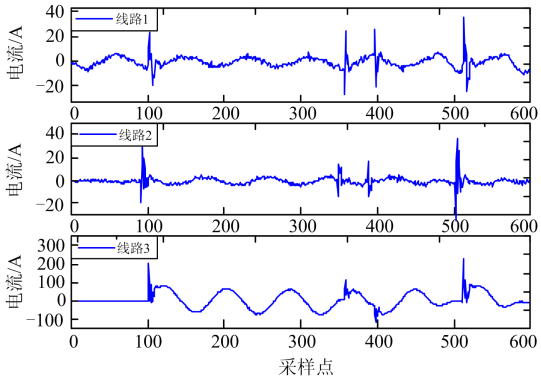

图 7 间歇性弧光接地故障各线路零序电流波形

Fig. 7 Zero-sequence current of intermittent arc ground fault

由于弧光放电的暂态过程明显，且第一次弧光放电一般暂态量最大，因此提取该间歇性弧光接地故障的各线路特征值时，利用首次弧光放电的波形数据即可。采用 db4 小波对故障数据进行尺度 4 小波分解，并构建小波能量矩阵如式(11)所示。

$$\boldsymbol{E}_{\text{sys}}=\begin{bmatrix}4.8257 & 1.4661 & 3.6162 & 0.7552\\ 3.6337 & 3.0556 & 6.5035 & 1.9333\\ 52.8477 & 12.4703 & 6.9733 & 2.3448\end{bmatrix} \tag{11}$$

可见，尺度 1 小波能量最大，仍可选择尺度 1 对应的频带 1 024~2 048 Hz 作为故障特征频带。

利用式(6)—式(8)提取各线路的三种故障特征值，结果如表 5 所示。

表 5 间歇性弧光接地故障各线路特征值

Table 5 Line characteristics of intermittent arc ground fault

线路编号	1	2	3
小波能量比	0.054 0	0.042 8	2.083 6
小波重构系数方差	2.342 1	3.973 8	43.935 7
暂态功率方向	81.69	105.08	−44.16

3.2 故障特征灵敏性分析

由表 3—表 5 可知，当发生金属性接地或间歇性弧光接地故障时，方差特征灵敏性更高，故障线路与非故障线路的小波系数方差的差异较明显；而当发生高阻接地故障时，故障线路与非故障线路的小波能量比差异最为显著，说明小波能量比特征灵敏性更高；暂态功率方向特征在高阻接地情况下会出现判断失误。

4 基于 DS 证据理论的选线融合判据

4.1 DS 证据理论

根据故障特征灵敏度分析可知，若结合三种故障特征形成融合判据，则小电流单相接地故障选线的可靠性将有所提高，且对不同故障类型的兼容度

也会有所提高。DS 证据理论非常适合进行互补信息的融合，是处理不确定性问题的完整理论，非常适合本文所研究的问题[21]。

电网发生单相接地故障时，可将所有馈线的故障区段波形数据构成一个辨识框架，用 Θ 来表示，$\Theta=\{\text{Line1},\text{Line2},\cdots,\text{Line}N\}$。在识别框架 Θ 上的基本概率分配(Basic Probability Assignment, BPA)是一个 $2^{\Theta}\to[0,1]$ 的函数 m，称为信度分配函数，并且满足：

$$\begin{cases} m(\phi)=0 \\ \sum_{A\subseteq\Theta} m(A)=1 \end{cases} \tag{12}$$

式中，使得 $m(A)>0$ 的 A 称为焦元。

3 个特征——小波能量比、小波重构系数方差、暂态功率方向的信度分配函数分别用 $m_1(\cdot)$、$m_2(\cdot)$、$m_3(\cdot)$ 来表示。多信息融合的关键是如何根据现有的数据构造出信度分配函数，信度分配函数的值应根据各选线特征的故障测度值构造出来。

小波能量比、小波重构系数方差的信度分配函数的构造步骤如下所述。

1) 对各方法计算得到的故障测度值归一化，得

$$\bar{F}_i(n)=\frac{F_i(n)}{\sum_{k=1}^{N}F_i(k)} \tag{13}$$

式中：$F_i(n)$ 为第 i 种选线特征下线路 n 的故障测度值；N 表示所分析的线路数目。

2) 构造信度分配函数 $m_i(n)$ 及不确定性描述函数 $m_i(\Theta)$ 分别为

$$\begin{cases} m_i(n)=\dfrac{\bar{F}_i(n)}{1+(1-\alpha_i)(1-\beta_i)} \\ m_i(\Theta)=\dfrac{(1-\alpha_i)(1-\beta_i)}{1+(1-\alpha_i)(1-\beta_i)} \end{cases} \tag{14}$$

式中：α_i 为第 i 个故障特征对各馈线的故障测度的最大值与次大值之差，反映故障特征的突出程度；β_i 为除去最大值，第 i 个故障特征对其余馈线的故障测度方差，表示多个故障样本之间故障特征的明显程度，两者的计算方法如式(15)—式(18)所示。

$$\alpha_i=\bar{F}_i(m)-\max_{k\neq m}\{\bar{F}_i(k)\} \tag{15}$$

$$\bar{F}_i(m)=\max\{\bar{F}_i(n)\} \tag{16}$$

$$\beta_i=\sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{k\neq m}^{N}(\bar{F}_i(k)-\omega_i)^2} \tag{17}$$

$$\omega_i=\frac{1}{N-1}\sum_{k\neq m}^{N}\bar{F}_i(k) \tag{18}$$

暂态功率方向系数由于不是单纯的标量值，且具备故障线路的暂态功率值为负的特性，因此本文对其信度分配函数设计如下：对于暂态功率方向系数为正的线路，其信度分配函数值为 0，对于暂态功率方向系数为负的线路，若只有一条，则其信度分配函数为 1，若有多条，则对这些线路的暂态功率方向系数进行归一化计算，再利用式(14)计算信度分配函数。

接下来使用证据合成公式，对于 $\forall A\subseteq\Theta$，识别框架 Θ 上的 3 个信度分配函数 m_1、m_2、m_3 的 Dempster 合成规则为

$$(m_1\oplus m_2\oplus m_3)(A)=\frac{1}{K}\sum_{A_1\cap A_2\cap A_3=A}m_1(A_1)\cdot m_2(A_2)\cdot m_3(A_3) \tag{19}$$

式中，$K=1-\sum_{A_1\cap A_2\cap A_3=\phi}m_1(A_1)\cdot m_2(A_2)\cdot m_3(A_3)$。

4.2 选线融合判据的制定

基于 4.1 节的理论，总结出基于 DS 证据理论的选线融合算法，由 3 个步骤组成。

1) 获得系统中各馈线故障区段的零序电压、零序电流，并进行小波分析，再依据 BPA 函数得到各选线特征对各线路的基本信度值。

2) 根据 Dempster 证据合成规则，计算所有选线特征对各线路的融合信度分配函数和不确定度 $m(\Theta)$，其中 i 表示线路编号。

3) 根据选线判定规则，得出选线结果。

融合判据的选线判定规则如下。

设存在两条馈线 $x,y\in\Theta$，满足：

$$m(\text{Line}(x))=\max\{m(\text{Line}(i)),i\in[1,N]\} \tag{20}$$

$$m(\text{Line}(y))=\max\{m(\text{Line}(i)),x\neq y\ \&\ i\in[1,N]\} \tag{21}$$

若有

$$m(\text{Line}(x))-m(\text{Line}(y))>\varepsilon_1 \tag{22}$$

$$m(\text{Line}(x))>m(\Theta) \tag{23}$$

$$m(\Theta)<\varepsilon_2 \tag{24}$$

则 x 为判决结果，其中 ε_1、ε_2 为预先设定的门槛。

4.3 算例

再次利用 3.1 节中的 3 个故障实例，利用合成规则对 3 个故障特征进行融合，得到各选线特征的信度分配函数如表 6 所示。

表 6 中“不确定”代表无法判断故障，即不确定的程度。根据多组现场录波数据的计算结果，可选 $\varepsilon_1=\varepsilon_2=0.1$。根据表 6 的数据，可以看出基于 DS 证据理论的选线融合判据特点如下。

1) 当所有选线特征都能够明确选择出故障线路时，如前文所述的金属性接地与间歇性弧光接地

表 6 各种接地故障的信度分配函数

Table 6 Reliability distribution function of various ground faults

故障类型	故障情况	$m_1(\cdot)$	$m_2(\cdot)$	$m_3(\cdot)$	融合结果
金属性接地	线路 1	0.023 2	0.039 1	0	0
	线路 2	0.018 3	0.066 4	0	0
	线路 3	0.893 9	0.733 5	1	1
	不确定	0.064 6	0.161 0	0	0
高阻接地	线路 1	0.297 9	0.178 3	0.401 1	0.803 9
	线路 2	0.144 5	0.159 6	0.227 0	0.197 6
	线路 3	0.137 3	0.169 0	0	0
	不确定	0.420 3	0.493 1	0.371 9	0.001 5
间歇性弧光接地	线路 1	0.023 2	0.038 8	0	0
	线路 2	0.018 3	0.065 8	0	0
	线路 3	0.893 9	0.727 7	1	1
	不确定	0.064 6	0.167 7	0	0

故障，融合判据能够得到绝对的选线结果，即故障线路的融合信度分配函数值为 1。

2) 当某些特征不能明确选择出故障线路时，融合判据能够给出一个融合选线结果，融合信度分配函数值的大小表征线路为故障线路的可能性，当融合结果满足式(22)—式(24)时，即可确定选线结果。

通过对多组录波数据的分析可以发现，对于不同故障类型，单一判据无法选出全部故障线路时，采用信息融合的方式可以明显提高选线的准确率。

5 结论

本文依据现场录波数据并结合小波理论提出了三种有效的单相接地故障特征，小波能量比、小波重构系数方差及暂态功率方向，并分析了它们对不同故障类型的灵敏度。分析表明，小波能量比特征更适用于高阻接地故障选线，小波重构系数方差及暂态功率方向较适用于金属性接地和间歇性弧光接地故障选线。

考虑到各个故障选线特征的检测灵敏性不同，提出了一种基于 DS 证据理论的选线融合判据，该判据可以有机地融合不同故障信息，兼容不同故障类型，能够提高接地故障选线的准确率。

参考文献

[1] 薛永瑞, 李娟, 陈筱蕾, 等. 谐振接地系统高阻接地故障暂态选线与过渡电阻辨识[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(17): 5037-5048, 5223.
XUE Yongduan, LI Juan, CHEN Xiaoru, et al Faulty feeder selection and transition resistance identification of high impedance fault in a resonant grounding system using transient signals[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17): 5037-5048, 5223.

[2] 薛永端, 李娟, 徐丙垠. 中性点经消弧线圈接地系统小电流接地故障暂态等值电路及暂态分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(22): 5703-5714.
XUE Yongduan, LI Juan, XU Bingyin. Transient equivalent circuit and transient analysis of single-phase earth fault in arc suppression coil grounded system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(22): 5703-5714.

[3] GOPAKUMAR P, MALLIKAJUNA B, REDDY M J B, et al. Remote monitoring system for real time detection and classification of transmission line faults in a power grid using PMU measurements[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 159-168. DOI: 10.1186/s41601-018-0089-x.

[4] 刘柱揆, 曹敏, 董涛. 基于波形相似度的小电流接地故障选线[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(21): 89-95.
LIU Zhukui, CAO Min, DONG Tao. Fault line selection of neutral indirectly grounding system based on waveform similarity[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(21): 89-95.

[5] XU Yan, LIU Jingyan, FU Yuan. Fault-line selection and fault-type recognition in DC systems based on graph theory[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 267-276. DOI: 10.1186/s41601-018-0098-9.

[6] 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.

[7] DENG Feng, ZENG Xiangjun, PAN Lanlan. Research on multi-terminal traveling wave fault location method in complicated networks based on cloud computing platform[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 199-210. DOI: 10.1186/s41601-017-0042-4.

[8] 陈博博, 屈卫锋, 杨宏宇, 等. 小电流接地系统单相接地综合电弧模型与选线方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 1-7.
CHEN Bobo, QU Weifeng, YANG Hongyu, et al. Research on single phase grounding arc model and line selection for neutral ineffectively grounding system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 1-7.

[9] 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. Fault line selection based on transient wavelet energy for non-solid-earthed network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(5): 70-75.

[10] 束洪春, 田鑫萃, 安娜. 采用实测数据和主成分分析的直流输电线路故障识别方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(21): 203-209.
SHU Hongchun, TIAN Xincui, AN Na. Fault identification method for DC transmission lines using measured data and principal component analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(21): 203-209.

[11] 张淑清, 马跃, 李盼, 等. 基于改进的广义谐波小波包分解和混沌振子的小电流接地系统故障选线[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 13-20, 43.
ZHANG Shuqing, MA Yue, LI Pan, et al. Application of improved generalized harmonic wavelet packet decomposition and chaos oscillator to fault line detection in small current grounding system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 13-20, 43.

[12] MALLIKARJUNA B, VARDHAN VARMA P V, SAMIR S D, et al. An adaptive supervised wide-area backup protection scheme for transmission lines protection[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 229-244. DOI: 10.1186/s41601-017-0053-1.

[13] SHAO Z, WANG L C, ZHANG H. A fault line selection method for small current grounding system based on big data[C] // IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, October 25-28, 2016, Xi'an, China: 2470-2474.

[14] 薛永端, 薛文君, 李娟, 等. 小电流接地故障暂态过程的 LC 谐振机理[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(24): 137-145.
XUE Yongduan, XUE Wenjun, LI Juan, et al. LC resonance mechanism of transient process of earth fault in non-solidly earthed network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(24): 137-145.

[15] GHADERI A, MOHAMMADPOUR H A, GINN H L, et al. High-impedance fault detection in the distribution network using the time-frequency-based algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(3): 1260-1268.

[16] 陈奎, 陈博博. 基于改进暂态相关分析和支持向量机的电弧故障选线研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(24): 66-73.
CHEN Kui, CHEN Bobo. Research on arc fault line selection based on improved transient correlation analysis and support vector machine[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(24): 66-73.

[17] 索超男, 张慧, 赵雄文. 小波基在低压电力线信道有色背景噪声建模中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(4): 121-125.
SUO Chaonan, ZHANG Hui, ZHAO Xiongwen. Research on the application of wavelet basis functions in modeling of colored background noise for low-voltage power line channels[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(4): 121-125.

[18] 陈奎, 韦晓广, 陈景波, 等. 基于样本数据处理和 ADABOOST 的小电流接地故障选线[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6228-6237.
CHEN Kui, WEI Xiaoguang, CHEN Jingbo, et al. Fault line detection using sampled data processing and ADABOOST for small current grounding system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6228-6237.

[19] 刘谋海, 方涛, 姜运, 等. 基于暂态主频分量相关性分析的故障选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 74-79.
LIU Mouhai, FANG Tao, JIANG Yun, et al. A new correlation analysis approach to fault line selection based on transient main-frequency components[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 74-79.

[20] 贾清泉, 刘连光, 杨以涵, 等. 应用小波检测故障突变特性实现配电网小电流故障选线保护[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(10): 78-82.
JIA Qingquan, LIU Lianguang, YANG Yihan, et al. Abrupt change detection with wavelet for small current fault relaying[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(10): 78-82.

[21] 刘晓明, 牟龙华, 张鑫. 基于信息融合的隔爆开关永磁机构储能电容失效诊断[J]. 煤炭学报, 2014, 39(10): 2121-2127.
LIU Xiaoming, MU Longhua, ZHANG Xin. Failure diagnosis for storage-capacitor in permanent magnetic actuator of flameproof switchgear based on information fusion[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(10): 2121-2127.

收稿日期：2018-04-16；　　修回日期：2018-09-27

作者简介：

邱　进(1981—)，男，工学硕士，高级工程师，研究方向为高压电器技术研究。Email: qiujin@epri.sgcc.com.cn

(编辑 许 威)