[控制系统]

基于暂态零模电流二维故障特征的小电流接地系统故障定段法

文/鹤壁汽车工程职业学院　赵　敏　吕　萌

具有多条馈线的小电流接地系统发生单相接地故障时，由于故障点上游方向暂态零模电流信号幅值大，能量集中频段低，而下游方向恰好相反，故障点两侧暂态零模电流含有不同的频率成分，其波形相似度低，据此提出一种基于暂态零模电流信号能量和重心频率二维故障特征的故障区段定位方法，充分利用故障暂态零模电流在频域的分布特征进行故障定段，使二维判据相互补充。ATP–EMTP仿真结果表明，该故障区段定位方法能够适应工程应用中可能存在的影响因素，具有鲁棒性好、定位准确、可靠性高等特点。

针对中性点非有效接地系统的故障定位问题，国内外开展了大量研究。小电流接地系统发生单相接地故障后，故障馈线故障点上游方向暂态零模电流信号幅值大，能量集中频段低，而下游方向波形幅值小，能量集中频段高，故障点上游与下游暂态零模电流含有不同的频率成分，其波形差异较大。本文依据故障区段两端暂态零模电流信号在暂态能量和能量集中频段两方面的差异，构建了基于比较二维故障特征的故障区段定位判据。利用小波包分解与单支重构得到的故障点上游及下游各检测点暂态零模电流信号的暂态能量分布特征结合暂态波形重心频率判断故障发生的区段，提高了定位的准确性和可靠性。通过ATP－EMTP建立仿真模型，对不同故障情况进行了大量仿真分析，证实了该方法的鲁棒性、可靠性。

暂态零模电流特性分析

小电流接地系统发生单相接地故障时，其零模等效电路如图1所示，假设故障发生在线路BC段，故障馈线故障点上游检测点A（或B）检测到的暂态零模电流为该检测点到母线段以及所有健全线路对地电容电流之和，而故障馈线故障点下游检测点C（或D）检测到的暂态零模电流为该检测点到线路末端的对地电容电流。

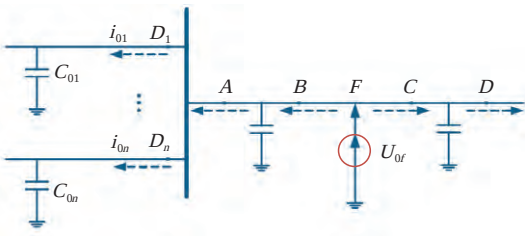

图1　小电流接地系统零模等效电路

对于故障点上游（或下游）任意两相邻检测点，其暂态零模电流之差为两检测点间区段对地分布电容电流，由于该电流相对于非故障线路零模电容电流总和而言比例很小，可忽略不计，故两相邻检测点的暂态零模电流幅值差异不大，波形基本相同。故障点两侧线路的暂态响应过程相互独立、互不影响，在故障点虚拟电源的作用下，从故障点流出的零模电流实际方向如图1虚线箭头所示，上游自故障点流向母线，下游自故障点流向负荷侧，背离母线，因此，B、C两相邻检

测点检测到的暂态零模电流初始极性相反，波形差异很大，不具备相似性。且由于故障点上游方向的线路总长度（包括健全线路）远大于下游，相应的其线路电感和对地分布电容也远大于后者，故上游方向信号幅值大，能量集中频段低，而下游方向波形幅值小，能量集中频段高，故障点两侧暂态零模电流信号含有不同的频率成分。对于谐振接地系统，由于暂态零模电流不受消弧线圈影响，因此其故障暂态零模电流仍具有上述分布特征及相似关系。

图2、图3分别为含有6条出线的小电流接地系统发生单相接地故障时（过渡电阻为0Ω，故障初相角为90°），故障点两侧A、B、C、D点（A、B点位于故障点上游，C、D点位于故障点下游）零模电流及其FFT频谱。图4、图5分别为过渡电阻为500Ω，故障初相角为0°情况下，故障点两侧A、B、C、D点零模电流及其FFT频谱。

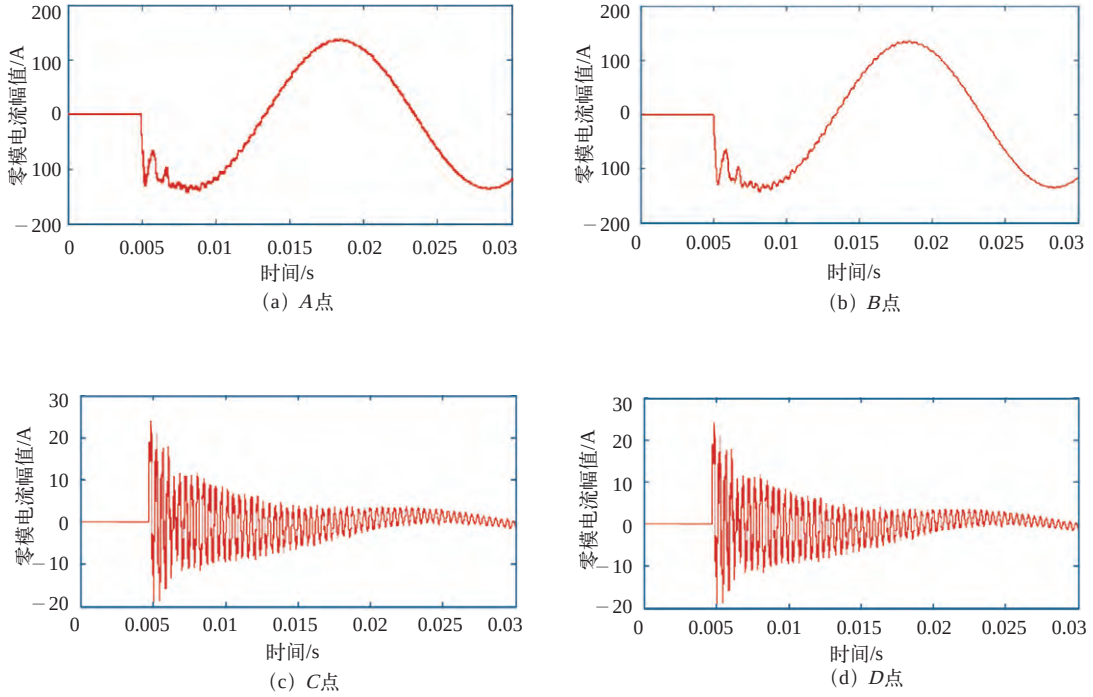

图2　故障初相角为90°时各检测点零模电流

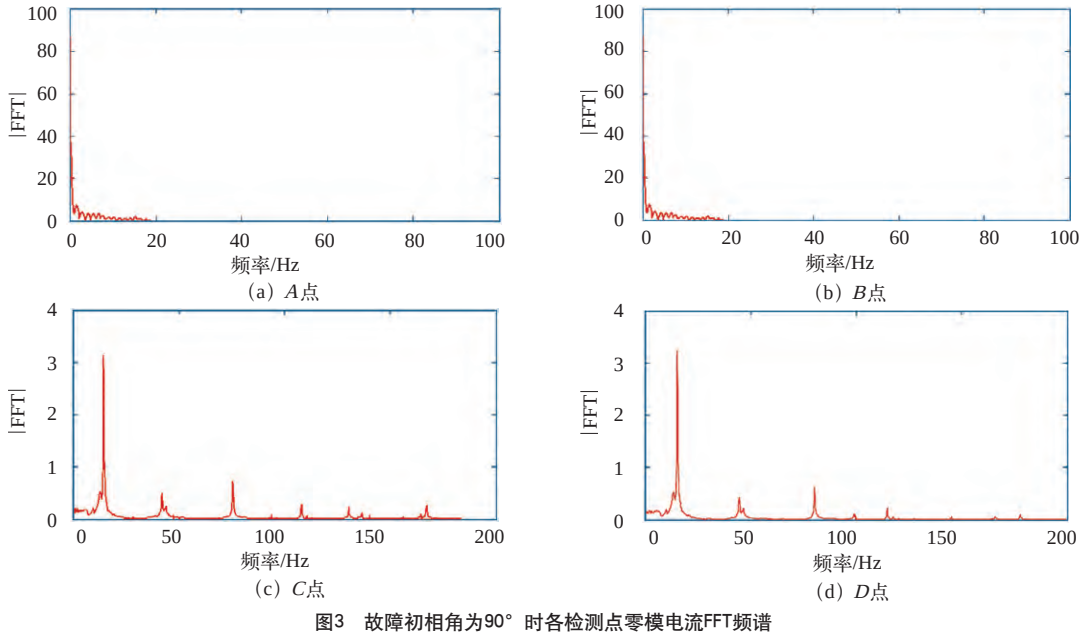

图3　故障初相角为90°时各检测点零模电流FFT频谱

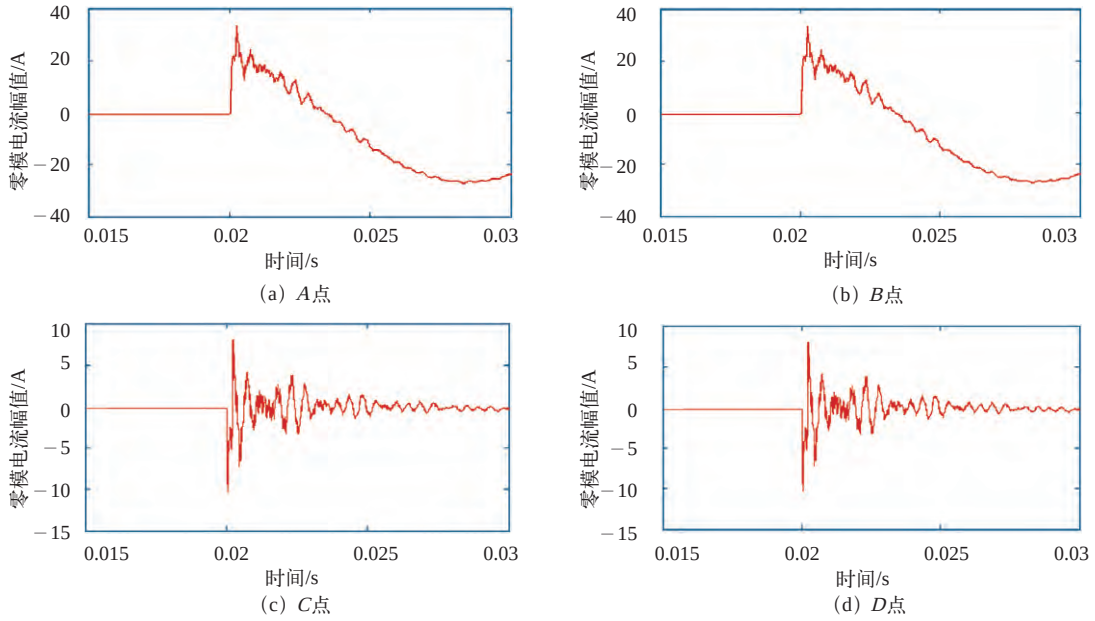

图4　故障初相角为0°时各检测点零模电流

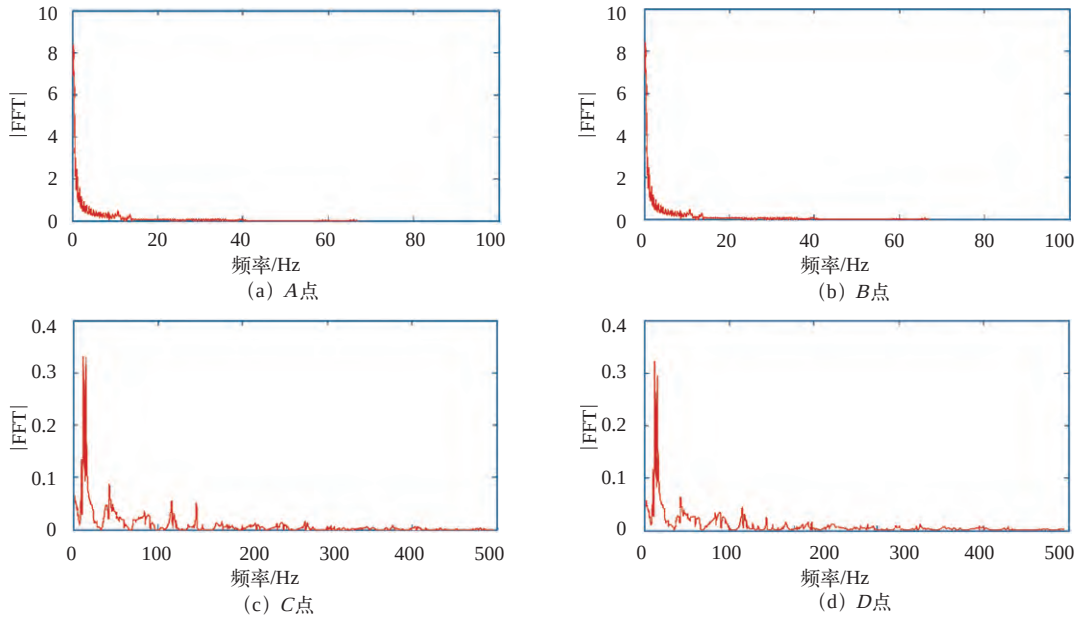

图5　故障初相角为0°各检测点零模电流FFT频谱

由图2～图5可知，小电流接地系统发生单相接地故障时，故障点上游方向和下游方向检测点零模电流在幅值和能量集中频段上存在较大差异，且受故障点过渡电阻和故障初相角影响小。因而利用暂态零模电流幅值和能量集中频段特征构造二维故障判据进行故障区段定位是可行的。

故障暂态零模电流二维特征的提取

由于FFT分析对信号具有单一的局部定位能力，也就是在时域的良好定位是以频域的全部信号分析为代价的，在频域的良好定位是以时域的全部信号分析为代价的，时域和频域分析存在矛盾。FFT适合分析平稳信号，对于非平稳时变信号却无能为力，且存在频谱泄露和栅栏效应。而小波包分解能够为信号提供一种更为精细的分析方法，对多分辨分析中未细分的高频部分进一步分解，并根据被分析信号的特征自适应选择相应频段，使之与信号频谱相匹配，从而提高时频分辨

率，因此本文利用小波包分析进行故障特征提取。鉴于Daubechies小波具有能量无损、选择灵活等优点，故本文采用Daubechies小波。考虑到DB小波阶数越高，频带划分效果越好，但同时紧支性减弱、计算量增加，实时性变差，因此选用DB10进行分析。仿真采样频率为1 MHz，小波包分解层数为13层，各频带宽度为61.035 Hz。因原始信号经小波包分解后数据量过少，无法满足信号能量分布的分析，故应对小波包分解得到的各频段信号进行单支重构提取暂态信号幅值和重心频率故障特征。

以各个频段重构信号的平方和求取该频段信号的暂态能量，第i频段能量为

$$E_i=\sum_{k=1}^{N}f_i^2(k) \tag{1}$$

式中，E_i为第i频段信号能量；N为该频段子空间样本长度；$f_i^2(k)$为该频段重构信号。

为提取暂态信号的幅值特征，考虑到基频信号有利于故障定位，因此用0～3 kHz频带范围的暂态信号能量和作为幅值特征，对应1～50频段，能量计算式为

$$E_{\text{sum}}=\sum_{i=1}^{50}E_i \tag{2}$$

式中，E_{sum}为1～50频段范围暂态信号总能量。

物理学中定义重心为物体各部分受重力作用集中的点，本文将重心概念加以推广得到反映暂态能量集中频段的重心频段，乘以频段宽度，求取暂态信号重心频率，描述零模暂态信号能量集中频段特征。重心频率计算式为

$$f_{\text{g}}=\frac{\sum_{i=1}^{50}E_i i}{\sum_{i=1}^{50}E_i}\times 61.035 \tag{3}$$

式中，f_{g}为重心频率，61.035为频段宽度。

故障定位算法

为了便于对各检测点暂态零模电流信号的二维故障特征进行定量比较，首先应对暂态信号的能量和重心频率进行归一化处理：能量基值取各检测点暂态零模电流能量最大值，重心频率基值取各检测点暂态零模电流重心频率最大值。暂态能量及重心频率归一化值计算式为

$$E_{\text{sum}j}^{*}=E_{\text{sum}j}/E_{\text{Max}} \tag{4}$$

$$f_{\text{g}j}^{*}=f_{\text{g}j}/f_{\text{gMax}} \tag{5}$$

式中，$E_{\text{sum}j}^{*}$、$f_{\text{g}j}^{*}$分别表示检测点j暂态零模电流信号能量及重心频率归一化值；$E_{\text{sum}j}$、$f_{\text{g}j}$分别表示检测点 暂态零模电流信号能量及重心频率有名值；E_{Max}、f_{gMax}分别为各检测点暂态零模电流信号能量最大值及重心频率最大值。

以重心频率归一化值为横轴、能量归一化值为纵轴建立坐标系，则检测点暂态零模电流信号的二维故障特征点可表示为坐标系点（$f_{\text{g}j}^{*}$，$E_{\text{sum}j}^{*}$）。由于故障点上游检测点暂态零模电流信号幅值大、能量集中频段低，而下游检测点暂态零模电流信号幅值小、能量集中频段高。因此，故障区段两端的暂态信号特征点在二维坐标系的位置存在较大差异，上游检测点暂态信号特征点位于坐标系左上角，而下游检测点暂态信号特征点位于坐标系右下角。通过比较各区段两相邻检测点暂态零模电流信号特征点的距离$d_{i,j}$判断故障区段，距离$d_{i,j}$由式（6）确定。

$$d_{i,j}=\sqrt{(f_{\text{g}i}^{*}-f_{\text{g}j}^{*})^2+(E_{\text{sum}i}^{*}-E_{\text{sum}j}^{*})^2} \tag{6}$$

式中，$f_{\text{g}i}^{*}$、$f_{\text{g}j}^{*}$分别为故障线路上两相邻检测点暂态零模电流信号重心频率归一化值；$E_{\text{sum}i}^{*}$、$E_{\text{sum}j}^{*}$分别为故障线路上两相邻检测点暂态零模电流信号能量归一化值。

显然，故障区段两相邻检测点的距离$d_{i,j}$最大，由此可判断故障发生区段。

ATP－EMTP仿真

为验证本文方法的有效性，利用ATP－EMTP搭建了小电流接地系统单相接地故障模型，如图6所示。

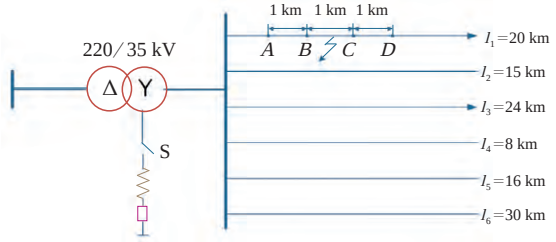

图6 小电流接地系统仿真模型

线路参数为：正序阻抗Z_1=(0.17+j0.38) Ω/km，正序对地导纳b_1=j3.045 μS/km，零序阻抗Z_0=(0.23+j1.72) Ω/km，零序对地导纳b_0=j1.884 μS/km。变压器参数为：Δ/Y联接，一次电压220 kV，二次电压35 kV，其中一次绕组漏阻抗$Z_{1\delta}$=(0.4+j12.2) Ω，

二次绕组漏阻抗$Z_{2\delta}$=（0.006+j0.183）Ω，稳态励磁电流为0.672 A，主磁通为202.2 Wb，励磁阻抗为400 kΩ。变压器额定容量为S_N=40 000kV·A，空载损耗为35.63 kW。消弧线圈参数为：运行于过补偿状态，补偿度为8%，消弧线圈串联电阻值按其感抗值的10%考虑，则串联电阻为121.35 Ω。

补偿度与消弧线圈电感值的对应关系为

$$L_{coil}=1/\left[3\omega^2C(1+p)\right] \tag{7}$$

式中，L_{coil}为消弧线圈电感值；ω为角频率；p为补偿度；C为系统所有出线零序电容的总和。负荷参数为：线路1和线路3均采用Z_l=(400+j20)Ω的等效阻抗模拟负荷。

因消弧线圈基本不影响计算结果，故本文以中性点经消弧线圈接地系统为例进行单相接地故障仿真。故障发生在出线1的*BC*段见图6，过渡电阻为500Ω，故障初相角为0°，各检测点暂态零模电流信号经小波包分解单支重构后得到的在0～3 kHz范围内的能量分布如图7所示。由图可知，故障点上游检测点A、B暂态能量明显大于下游检测点*C*、*D*，且*A*、*B*检测点暂态零模电流信号能量主要集中于低频段，而*C*、*D*检测点暂态零模电流信号能量主要集中于高频段，其重心频率较之*A*、*B*检测点要高。

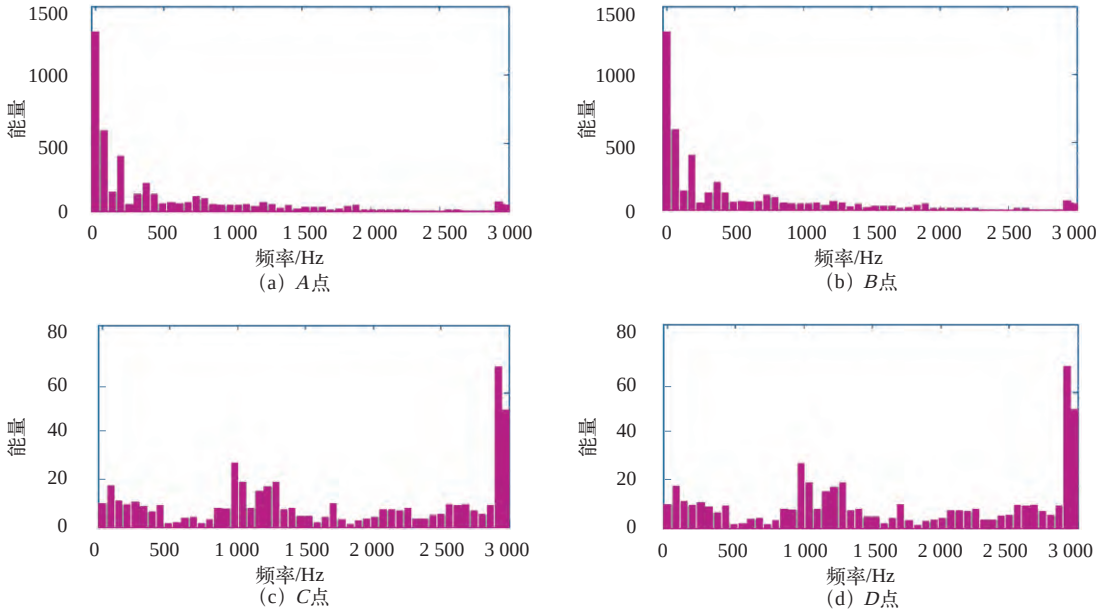

图7　各检测点暂态零模电流信号能量分布

图8为不同故障情况下各检测点暂态零模电流信号特征点在二维坐标系中的分布图。

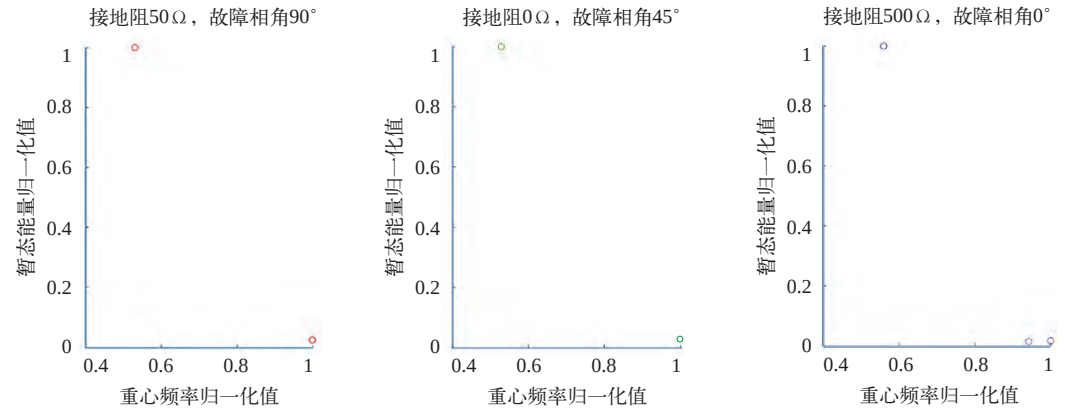

图8　不同故障情况下特征点分布图

上述仿真分析仅考虑故障馈线故障点上游及下游共4个检测点处暂态零模电流信号的二维故障特征，通过大量仿真证实其他检测点处的故障特征也遵循上述规律，即故障点上游方向信号幅值大，能量集中频段低，而下游方向波形幅值小，能量集中频段高，故障点两侧暂态零模电流信号含有不同的频率成分。

本文针对各种不同故障情况（故障出线、故障初相角、故障距离、故障电阻）进行了大量的仿真验证，限于篇幅仅给出故障发生在出线1的*BC*区段，故障初相角为0°、45°、90°，过渡电阻为5Ω、50Ω、500Ω、5 000Ω情况下的仿真结果，如下表所示。由表中数据知，该故障定段法在各种情况下都能准确可靠地确定故障区段，并且具有足够的裕度。即使对5kΩ高阻接地的情况仍能准确定位故障区段，抗干扰能力强。

表　不同故障情况下相邻检测点特征距离

故障初相角/（°）	过渡电阻/Ω	$d_{A,B}$	$d_{B,C}$	$d_{C,D}$
0°	5	0.005 0	0.972 0	0.009 6
	50	0.000 6	1.019 0	0.002 0
	500	0.000 6	1.026 5	0.001 7
	5 000	0.000 6	0.952 2	0.030 6
45°	5	0.000 1	1.050 1	0.001 1
	50	0.000 3	1.049 1	0.001 1
	500	0.000 3	1.048 9	0.001 1
	5 000	0.000 5	1.087 0	0.006 0
90°	5	0.000 3	1.058 7	0.001 4
	50	0.000 2	1.048 6	0.001 3
	500	0.000 1	1.031 8	0.001 0
	5 000	0.000 1	1.065 9	0.006 5

结论

提出了一种基于故障暂态零模电流二维特征求取相邻检测点特征距离定位故障区段的方法。

1）通过对单相接地故障暂态零模电流信号的研究发现，故障点上游与下游故障暂态信号在幅值和能量集中频段上存在很大差异，且受故障初相角及故障电阻的影响小。

2）利用零模电流信号暂态能量和重心频率二维故障特征构造故障定位判据，建立二维坐标系定量刻画不同区段相邻检测点的特征距离，特征距离值最大的区段即为故障区段。

3）该方法充分利用暂态信号在频域的整体分布规律并结合其幅值特征，完整描述了故障暂态特征，使二维判据之间相互补充，对于不同故障情况均能可靠定位故障区段。ATP-EMTP仿真证实了该方法的鲁棒性、提高了定位的可信度。EA

（收稿日期：2014.09.18）
（编辑：杨得润）

（上接第97页）

事后配置了交流稳压器，而传统交流稳压器的响应速度时间大于100 ms，依旧无法满足要求。然后换成ADVR瞬态电压补偿器，于是用户长时间受电能质量困扰的问题就此迎刃而解。

结束语

电能在每秒钟数次的幅度波动，按照频率计算，速度时间已经是小于50 ms，以电能质量的时间理论要求，这种突变动态过程，属于瞬态的概念范畴，要实现快速稳压已经“力不从心”。交流稳压器其响应速度参数，如果大于100 ms就无法胜任于瞬态变化的用电环境。改善电能质量，保障产品加工质量有着重大意义，电能质量直接关系到国民经济的总体效益。使用数控机床设备时，应当配置相应的交流稳压器，以起到事半功倍的作用。EA

（收稿日期：2015.01.10）
（编辑：杨得润）