

「控制系统」

# 基于S变换的配电线路故障区段定位方法

文/鹤壁汽车工程职业学院电动汽车驱动及控制系统研究所 赵 敏 吕 萌

提出一种基于S变换模时频矩阵相似度的配电线路故障区段定位新方法。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、定位准确和可靠性高等特点。

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、暂态过程主谐振频率低,而下游方向波形幅值小、主谐振频率高,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。鉴于此,基于数字图像处理中相似度的思想,提出利用S变换模时频矩阵相似度判断单相接地故障区段的方法,即通过求取故障馈线各区段两端相邻检测点故障暂态零模电流信号的S变换模时频矩阵的相似度来确定故障区段。

## 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及所有健全线路对地电容电流之和。对于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。

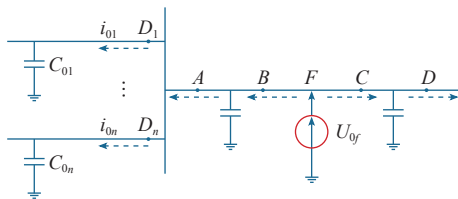
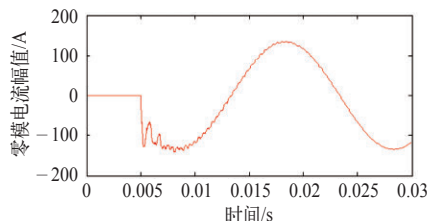


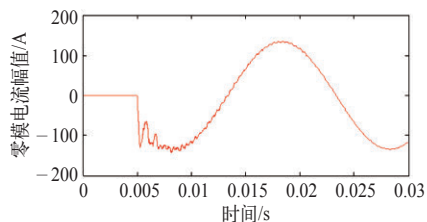
图1 小电流接地系统零模等效电路

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,波形形状基本相同。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。

图2、图3所示的是含有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 $0\ \Omega$ 、故障初相角为 $90^\circ$ 及过渡电阻为 $500\ \Omega$ 、故障初相角为 $0^\circ$



(a) A点



(b) B点

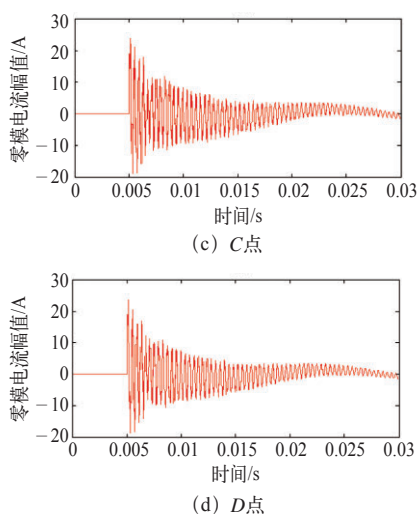


图2 故障初相角为90°各检测点零模电流

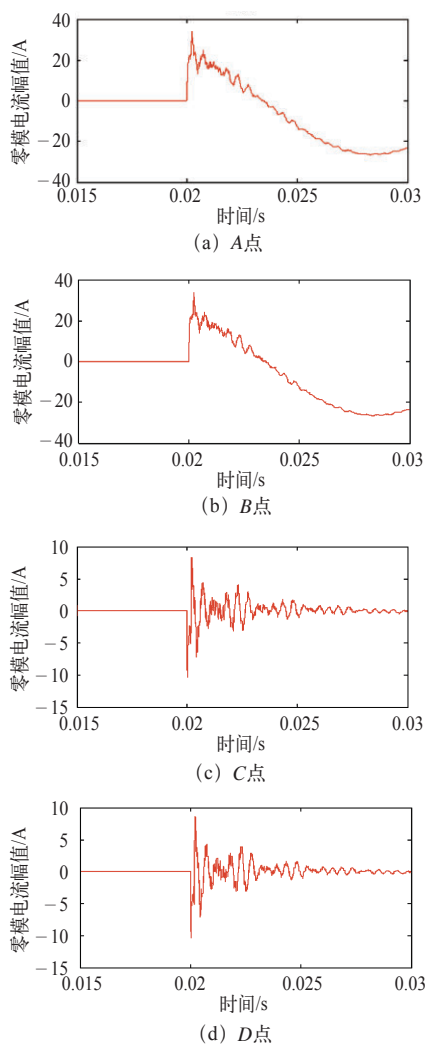


图3 故障初相角为0°各检测点零模电流

的情况下,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)的零模

电流。

由图2、图3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。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近似关系。

## S变换基本原理

S变换是由Stockwell等学者于1996年引入的一种数字信号处理技术。S变换可视为短时傅里叶变换(STFT)与连续小波变换(CWT)的结合。

信号 $x(t)$ 的一维连续S变换被定义为

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\tau-t)^2 f^2}{2}\right] \times \exp(-i2\pi ft) dt \quad (1)$$

式中, $\tau$ 为控制高斯窗口在时间 $t$ 轴位置的参数; $f$ 为频率; $i$ 为虚数单位。

其一维连续逆变换为

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \int_{-\infty}^{\infty} S(\tau, f) d\tau \right] \exp(i2\pi ft) df \quad (2)$$

其一维离散S变换为

$$S\left[jT, \frac{n}{NT}\right] = \sum_{m=0}^{N-1} X\left[\frac{m+n}{NT}\right] \exp\left(-\frac{2\pi^2 m^2}{n^2}\right) \exp\left(j\frac{2\pi mi}{N}\right) \quad (3)$$

式中,代表时间的 $j=0, 1, \dots, N-1$ ,代表频率的 $n=1, 2, \dots, n-1$ 。

由式(3)可知,S变换能够通过快速傅里叶变换实现快速计算。同样可以发现,采样时间序列 $x[kT]$ 经S变换的结果是一个复矩阵,将矩阵中各个元素取模后即得模时频矩阵MTFM(module time-frequency matrix),其列矢量为信号某一时刻的幅值随频率变化的分布,其行矢量为信号某一频率处的幅值随时间变化的分布。因此MTFM某位置元素的大小就是相应频率和时间处信号S变换的幅值。利用STFT可得到类似的MTFM,但是与STFT相比,一方面S变换克服了STFT窗函数长度不易确定的问题;另一方面,S变换具有与小波变换类似的时频分辨特性。故采用MTFM更适合分析具有突变特性的配电线路非平稳暂态单相接地故障信号,在信号特征提取方面具有结果直观、物理含义明确的优势。

### 模时频矩阵相似度

故障馈线各检测装置的暂态零模电流信号经S变换后得到MTFM,其中每个元素表示信号在对应时刻和频率处的幅值,类似于数字图像中的像素矩阵。因此,可将MTFM用时频图像直观地显示,并将图像识别中的相似度分类识别方法应用于故障区段判别。

基于数字图像处理中相似度的概念,设 $M_A$ 、 $M_B$ 分别为某区段两端相邻检测装置的故障暂态零模电流波形的MTFM,则其故障暂态零模电流波形的相似度可定义为

$$D_{AB} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [M_A(i, j) - M_B(i, j)]^2 \quad (4)$$

经推导可得出相似度 $S_{AB}$ 为

$$S_{AB} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N M_A(i, j) \times M_B(i, j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N M_A^2(i, j) \times \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N M_B^2(i, j)}} \quad (5)$$

式中,  $|S_{AB}| \leq 1$ 。 $S_{AB}$ 值越大,表明相邻检测点故障暂态零模电流波形相似度越高。当 $S_{AB} = 1$ 时,说明相邻检测点故障暂态零模电流波形一致。

### 故障定位方案

S变换具有与小波变换类似的时频分辨特性,MTFM能够全面表征信号从基频至高频相当宽的频带范围内幅值分布的特征,亦即MTFM全面细致地反映了故障暂态零模电流信号在幅值和频率成分分布上的差异。因此利用表征MTFM元素接近程度的相似度量化MTFM之间的差异,描述各区段相邻检测装置处故障暂态零模电流信号之间的相似程度,即可实现对故障馈线故障区段的定位,具体定位步骤如图4所示。

对于故障发生在线路末端的情况,故障点下

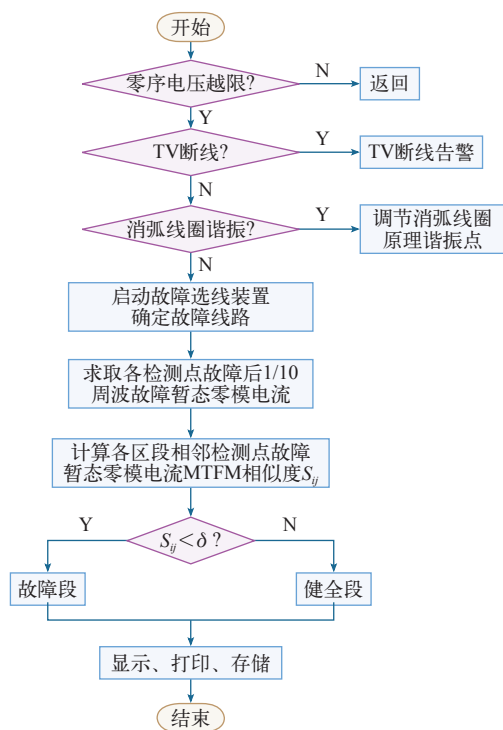


图4 故障定位流程

游线路对地分布电容电流微弱,下游检测装置无法检测到零模电流信号,此时沿故障馈线找到第一个检测不到零模电流信号的检测装置,其上游相邻区段即为故障区段。

### 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5所示。

线路参数为:正序阻抗 $Z_1 = (0.17 + j0.38) \Omega/\text{km}$ ,正序对地导纳 $b_1 = j3.045 \mu\text{S}/\text{km}$ ,零序阻抗 $Z_0 = (0.23 + j1.72) \Omega/\text{km}$ ,零序对地导纳 $b_0 = j1.884 \mu\text{S}/\text{km}$ 。变压器参数为: $\Delta/Y$ 联接,一次

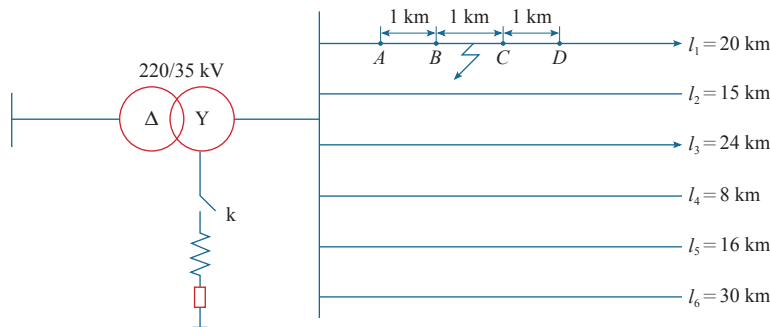


图5 小电流接地系统仿真模型

电压220 kV，二次电压35 kV，其中一次绕组漏阻抗 $Z_{1\delta} = (0.4 + j12.2) \Omega$ ，二次绕组漏阻抗 $Z_{2\delta} = (0.006 + j0.183) \Omega$ ，稳态激磁电流为0.672 A，主磁通为202.2 Wb，励磁阻抗为400 k $\Omega$ 。变压器额定容量 $S_N = 40\ 000\ \text{kV}\cdot\text{A}$ ，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  $\Omega$ 。补偿度与消弧线圈电感值的对应关系为

$$L_{\text{coil}} = 1/[3\omega^2 C(1+p)] \quad (6)$$

式中， $L_{\text{coil}}$ 为消弧线圈电感值； $\omega$ 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 $Z_l = (400 + j20) \Omega$ 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。如图5所示，故障发生在出线1的BC段，过渡电阻为500  $\Omega$ ，故障初相角为90°，各检测点暂态零模电流信号经S变换得到的MTFM图像如图6所示。

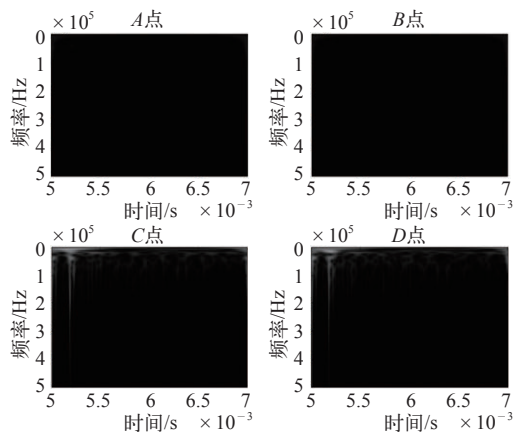


图6 各检测点暂态零模电流信号模时频矩阵图像

由图可知，故障后1/10周期，故障点上游（下游）A、B（C、D）检测点暂态零模电流信号MTFM图像相似度高，而故障点两侧B、C检测点暂态零模电流信号MTFM图像相似度低，充分证明了本文所提出的故障定位方法的可行性。

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°、30°、45°、60°和90°，过渡电阻为5  $\Omega$ 、50  $\Omega$ 、500  $\Omega$ 和5 000  $\Omega$ 情况下的仿真结果，如下表所示。

表 不同故障情况下相邻检测点模时频矩阵相似度

| 故障初相角/ (°) | 过渡电阻/ $\Omega$ | $S_{AB}$ | $S_{BC}$ | $S_{CD}$ |
|------------|----------------|----------|----------|----------|
| 0          | 5              | 0.963 6  | 0.167 3  | 0.965 9  |
|            | 50             | 0.988 3  | 0.213 2  | 0.999 2  |
|            | 500            | 0.986 8  | 0.013 2  | 0.994 5  |
|            | 5 000          | 0.975 2  | 0.252 2  | 0.957 5  |
| 30         | 5              | 0.999 9  | 0.139 1  | 0.970 5  |
|            | 50             | 1.000 0  | 0.130 5  | 0.974 8  |
|            | 500            | 1.000 0  | 0.197 4  | 0.966 0  |
|            | 5 000          | 0.999 7  | 0.142 9  | 0.961 6  |
| 45         | 5              | 0.999 5  | 0.122 8  | 0.973 5  |
|            | 50             | 0.999 9  | 0.131 9  | 0.982 7  |
|            | 500            | 0.999 8  | 0.167 5  | 0.973 8  |
|            | 5 000          | 0.999 8  | 0.237 4  | 0.918 4  |
| 60         | 5              | 1.000 0  | 0.162 3  | 0.997 7  |
|            | 50             | 1.000 0  | 0.163 9  | 0.993 5  |
|            | 500            | 1.000 0  | 0.168 1  | 0.998 5  |
|            | 5 000          | 0.997 9  | 0.291 1  | 0.980 4  |
| 90         | 5              | 0.999 4  | 0.110 4  | 0.958 7  |
|            | 50             | 0.999 3  | 0.040 6  | 0.952 6  |
|            | 500            | 0.998 6  | 0.267 0  | 0.888 8  |
|            | 5 000          | 0.997 1  | 0.103 3  | 0.929 9  |

由表中数据知，本文提出的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5 k $\Omega$ 高阻接地的情况仍能准确定位故障区段，抗干扰能力强。大量仿真分析表明，相似度 $S_{ij}$ 阈值 $\delta$ 设定为0.3即可满足故障定位精度要求。

## 结束语

本文提出了一种基于故障暂态零模电流S变换模时频矩阵相似度的小电流接地系统故障区段定位方法，所做的主要工作如下。

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S变换模时频矩阵相似度量故障区段相邻检测点故障暂态零模电流存在的差异，方法简单实用。

3) 仿真结果证明，该方法鲁棒性好，定位准确率高，是一种有效的故障定段方法。

4) 不受消弧线圈影响，无需加装电压互感器及其他信号注入设备，成本低且易于实施。EA

(收稿日期：2014.09.26)

(编辑：杨得润)