

引用格式:杨小磊,袁明哲,邹经鑫.基于零模行波S变换时频矩阵的配电网单相接地故障定位方法[J].电力科学与技术学报,2024,39(4):93-101.

Citation: YANG Xiaolei, YUAN Mingzhe, ZOU Jingxin. Accurate location method of single-phase-to-ground fault in distribution network based on zero-mode traveling-wave S-transform time-frequency matrix[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(4): 93-101.

# 基于零模行波 S 变换时频矩阵的配电网 单相接地故障定位方法

杨小磊<sup>1</sup>, 袁明哲<sup>2</sup>, 邹经鑫<sup>2</sup>

(1. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041; 2. 国网四川省电力公司成都供电公司, 四川 成都 610042)

**摘要:**为提高配电网发生单相接地故障时的定位精度,提出一种基于电压零模行波S变换时频矩阵的选线和定位方法。首先,将各条馈线末端行波检测装置测得的行波信号解耦,得到故障电压零模行波;然后,在主馈线、一级和二级分支支路等特殊位置设置故障,得到对应故障位置的S变换时频矩阵,建立确定故障支路的对比库;最后,将故障零模电压行波S变换时频矩阵与对比库中数据进行相似度对比,确定单相接地故障发生的馈线和所在支路,针对不同性质支路选取适应性最优的定位方法,实现配电网单相接地故障的精确定位。仿真结果表明:该方法的定位准确度高,且无须全网配备行波检测装置便能够实现配电网单相接地故障的精确定位。

**关键词:**配电网;行波定位;S变换;矩阵相似度

**DOI:** 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.04.011 **中图分类号:** TM862 **文章编号:** 1673-9140(2024)04-0093-09

## Accurate location method of single-phase-to-ground fault in distribution network based on zero-mode traveling-wave S-transform time-frequency matrix

YANG Xiaolei<sup>1</sup>, YUAN Mingzhe<sup>2</sup>, ZOU Jingxin<sup>2</sup>

(1. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, China; 2. Chengdu Power Supply Company, State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610042)

**Abstract:** To improve the accuracy of fault location in the case of single-phase grounding faults in distribution networks, a method for fault line selection and location based on the voltage zero-mode traveling-wave S-transform time-frequency matrix is proposed. First, the traveling-wave signals measured by the traveling-wave detection devices at the ends of each feeder are decoupled to obtain the fault voltage zero-mode traveling wave. Then, faults are set at special locations such as the main feeder, primary and secondary branch lines to obtain the S-transform time-frequency matrix corresponding to the fault location, and a comparison library for determining the fault branch is established. Finally, the S-transform time-frequency matrix of the fault zero-mode voltage traveling wave is compared with the data in the comparison library for similarity to determine the feeder and branch where the single-phase grounding fault occurs. The optimal location method is selected for different types of branches to achieve precise location of single-phase grounding faults in distribution networks. Simulation results show that this method has high accuracy in fault location and can achieve precise location of single-phase grounding faults in distribution networks without the need for traveling-wave detection devices across the entire distribution network.

**Key words:** distribution network; traveling wave positioning; S-transformation; matrix similarity

在中国,配电网发生单相接地故障的可能性最大<sup>[1]</sup>,由于配电网的中性点一般采用非直接接地的

方式,接地电阻的阻值一般也较大,所以单相接地故障产生的故障电流十分微弱,这些因素使得传统

收稿日期:2023-07-19;修回日期:2024-03-19

基金项目:国家电网有限公司科技项目(5400-202126143A-0-0-00)

通信作者:杨小磊(1985—),男,硕士,高级工程师,主要从事电力调度自动化、电力系统继电保护的研究;E-mail:406662394@qq.com

的配电网故障定位的精度难以适应电网的运行要求。因此,准确、快速确定发生故障的馈线,并设计更加精确的故障定位方法,对保障配电网的安全稳定运行尤为重要。

配电网拓扑结构错综复杂且运行多变,馈线上的分支繁多,给故障精确定位技术带来很大困难;并且配电线路长度往往较短,因而从电网运维的角度来看,故障定位精度则必须高于输电线路。配电网故障定位方法主要有阻抗法<sup>[2]</sup>、注入信号法<sup>[3]</sup>及行波法<sup>[4]</sup>,也可分为暂态信息定位和利用稳态信息定位方法。阻抗法定位原理简单、容易实现,但是定位精度不高;行波法和注入信号法对信号采集装置都提出了更高的要求。文献[5-6]提出了根据阻抗法原理的配电网故障精确定位方法,方法简单、容易理解,但较大程度上依赖传感器测量得到的数据实现定位,且需忽略传感器测得的电流、电压一次侧与二次侧传变特性不一致以及故障时三相参数不对称的情况,因而定位精度不高,并且在分支较多时还存在多个故障点无法分辨的情况。

文献[7]发现所测单端暂态波形在特定频段的能量谱分布明显不同,以此为特征对所测单端暂态波形的能量谱和电网其他部分对应的能量谱进行相似度判断,当相似度达到特定值时,则可判断此区段内已经发生故障;文献[8]根据时频谱的相似度识别原理,提出根据时频谱相似度设计高压直流线的保护方案,较大程度提取故障行波的暂态时域和频域上的丰富信息,高阻接地时仍然具有较好的故障识别效果;当配电网发生小电流单相接地时,文献[9]发现A、B、C三相所测故障电流的幅值会发生不同程度的变化,根据三相故障电流故障前、后幅值变化量设置判据来判断故障相,并可以实现故障区段定位;文献[10-14]未利用故障点传递而来的行波信息,而是在配电网中加入了调制的特定信号,利用已有电网中的检测装置,对检测到的电网中折反射后的特定信号分析故障位置,但此种方法的可靠性受间歇性电弧波动、过渡电阻等因素的影响,实际应用中效果不佳。

根据行波原理的故障线路准确判断和线路保护与准确迅速定位方法不受过渡电阻的影响,互感器是否饱和以及系统是否发生振荡对其定位精度也没有太大干扰,因而从该方法提出以来,迅速成为了国内外继电保护领域的热点研究课题。传统的利用单端行波进行定位的原理实现简单、可靠性高,但是却易受到配电网繁杂线路折反射的干扰;

双端定位方法的定位精度高,却极易受到两侧时间同步影响,从而产生原理上的误差。文献[15-17]利用线模行波的波速度几乎无衰减而零模行波的传输波速在线路中衰减较快的原理,根据两者波速差来进行配电线路故障精确定位。但是该算法对零模波速提取精度要求较高,而由于零模波速变化较大、无法精确测定,且零模波头识别困难,难以做到现场应用。文献[18]记录行波到达各行波检测装置时刻,并将其两两作差,形成对称的时间差值矩阵,通过对比故障前、后的矩阵元素数值差别,完成了故障的精确定位。该方法不受配电线路的复杂拓扑以及线路分支数量多少的影响,但是,拓扑结构发生变化时需要重新构成矩阵,所以更加适用于拓扑结构较为固定的情况。文献[19-20]同样是根据配电网的测量信息和拓扑结构形成矩阵,将明显的错误时间信息和拓扑信息删除后,根据剩余的准确有效信息进行定位。

针对现存方法存在的问题,本文提出一种新的定位方法,即利用S变换后的时频矩阵,通过对比矩阵相似度对配电网单相接地故障进行精确定位。故障行波包含时间、幅值等可直观得到的故障信息,同时也包含丰富的相互耦合关联的高纬度故障信息。S变换下的时频矩阵可以充分提取并展示故障线路与非故障线路的波形差异,借此选出故障所在支路,再利用改进的基于零一线模波速差的方法,即使在检测装置未全面覆盖的情况下,只要每条馈线终端的检测装置能够进行可靠记录,也能进行配电网单相接地故障的精确定位。

## 1 行波模量时差与故障位置的关系

当配电网在发生接地故障时,会从故障点向线路两端传递行波,行波的零模与线模分量在开始时的波速是相同的,但行波的零模与线模分量的性质不同,线模分量的衰减小、波速几乎保持恒定,而零模分量的衰减大,波速随着传播距离的延长逐渐降低,即在同一测量点,当故障位置距离测量点的距离越长时,零模与线模行波的波头到达测量点时间的差值越大。时域中行波的传播时间与故障位置之间的关系如图1所示, $m$ 、 $n$ 分别为线路两端位置的行波测量装置, $t_{1-M}$ 为装置 $m$ 的线模行波到达时刻, $t_{0-M}$ 为装置 $m$ 的零模行波到达时刻, $\Delta t_M$ 为装置 $m$ 测得的零模和线模行波之间的时间差,其值为 $\Delta t_M = t_{0-M} - t_{1-M}$ 。同理, $t_{1-N}$ 、 $t_{0-N}$ 分别为装置 $n$ 的线模和零模行波的到达时刻, $\Delta t_N$ 为装置 $n$ 测得的零模和

线模行波之间的时间差。

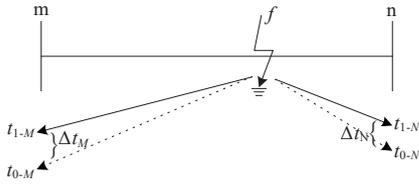


图 1 行波模量在配电线路上传播示意

Figure 1 Propagation diagram of traveling-wave modulus on distribution lines

假设配电线路单位长度为  $dx$ , 则行波在单位长度上的传播时间  $t=dx/v$ 。由于配电网的架空线一般较短, 线模行波的波速  $v_1$  衰减微弱, 几乎保持恒定; 而零模行波的波速  $v_0$  随着传播距离的延长, 其值不断减小, 即  $v_1 > v_0$ , 导致线模行波的传播时间  $t_1 < t_0$ , 且距离故障位置  $f$  越远, 其差值越大。

## 2 配电网故障馈线的判定方法

### 2.1 故障行波特征

典型的辐射状配电网拓扑模型如图 2 所示, 变电站高压母线连接了  $n$  条配网馈线, 每条馈线的参数相同, 即波阻抗大小一致。假设馈线 1 发生单相接地故障, 根据行波的折反射规律, 计算可得行波的幅值表达式为

$$\begin{cases} u_A = 2u_F/n \\ i_F = -2(n-1)u_F/nz \\ i_N = 2u_F/nz \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $u_F$  为源自故障点的电压行波;  $u_A$  为母线上的电压行波;  $i_F$  为故障馈线靠近母线处的电流行波;  $i_N$  为故障馈线以外的其他馈线靠近母线处的电流行波;  $z$  为波阻抗。

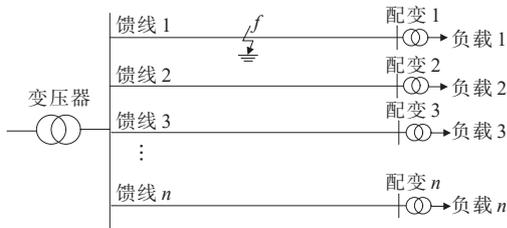


图 2 典型辐射状配电网模型

Figure 2 Typical model of radial distribution network

根据式(1)分析可知, 故障馈线首端所测电压与电流行波极性相反, 而其他正常的馈线所测电压与电流行波的极性相同, 因此, 可以通过行波的极性对故障馈线进行判别。但是, 当接地电阻阻值大且故障发生在初相角接近 0 时, 电压与电流行波的

幅值减小, 难以准确分辨电压与电流行波的极性, 因而无法准确判别故障馈线。因此, 本文根据行波波波形与故障位置之间一一对应的原理<sup>[21-22]</sup>, 提出一种利用行波 S 变换后的时频矩阵进行故障选线的方法。

### 2.2 故障馈线的判定方法

行波波波形与其故障位置之间存在一一对应的关系, 且行波的波形中包含其时间、幅值、极性以及频率等大量与故障发生位置相关的特征信息, 单一使用某个特征信息进行故障选线或者定位是不全面的, 可能会存在死区。因此, 本文利用 S 变换将时域行波信号分解到时频域上, 放大故障特征信息, 通过配电网特定位置设置故障, 获得故障行波信号进行建库处理, 对比行波的 S 变换后时频矩阵的相似度即可准确判定故障发生的馈线。

#### 2.2.1 S 变换原理

S 变换的分辨率高, 且窗口可随频率变化而变化, 兼具小波变换与短时傅里叶变换的优点, 在时域和频率域上都具有较好的分辨率。因此, 对于分析配电网故障行波这种非平稳的信号具有良好的效果<sup>[23]</sup>。假设存在波形数据信号  $h(t)$ , 其 S 变换的定义式为

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

式中,  $\tau$  为时间;  $f$  为频率;  $i$  为虚数单位。

S 变换的结果是二维矩阵, 包含行波的时频特征信息, 矩阵的元素是复数, 可以从中获得行波的幅值与相位信息, 每一列的元素表示不同时间上的信息, 每一行的元素表示不同频率上的信息。

#### 2.2.2 行波模量选择

当配电网电力线路发生单相接地时, 会从故障点向线路两端直至全网传播行波, 由于 A、B、C 三相线路之间存在电与磁的相互耦合, 难以单独分析某一相行波传播特性, 因此, 需先对每相行波进行解耦处理再对其进行分析。本文选择 Karenbauer 变换进行解耦处理, 将 A、B、C 三相电压分量分解为相互独立的零模、1 模和 2 模分量。

$$\begin{bmatrix} u_0 \\ u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

因为行波的零模分量幅值对比线模分量更大、衰减程度高, 包含影响行波衰减过程的大量故障特征信息, 并且容易被提取出来, 故本文选取行波的

零模分量进行深入分析,通过S变换形成时频矩阵来提取故障行波的时频特征。在接地电阻为200 Ω、故障初相角为90°的情况下,由线路末端测量所得行波线模和零模分量,如图3所示,不难看出故障和非故障线路之间的行波波形差异明显。

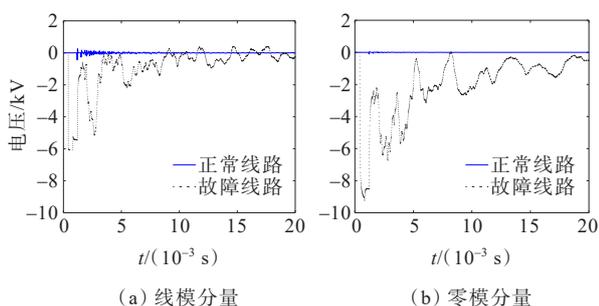


图3 行波线模和零模分量对比

Figure 3 Comparison of linear mode and zero mode components of traveling wave

### 2.2.3 故障对比库的建立

某35 kV配电网如图4所示, $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ 分别为35 kV母线上的馈线, $L_{2-1}$ 和 $L_{2-2}$ 、 $L_{3-1}$ 和 $L_{3-2}$ 分别为馈线 $L_2$ 、 $L_3$ 上的二级分支, $L_{3-1-1}$ 、 $L_{3-1-2}$ 为馈线 $L_3$ 上二级分支 $L_{3-1}$ 上的三级分支。

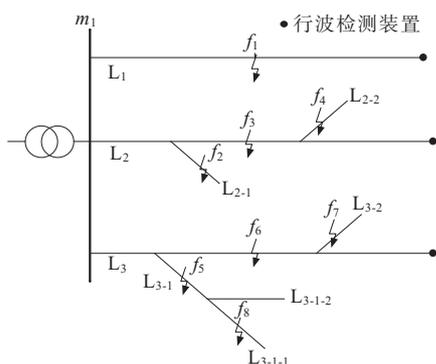


图4 含二级分支的配电网模型

Figure 4 Distribution network model with secondary branches

以图4配电网拓扑图为例,在PSCAD中搭建仿真模型,分别在馈线 $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ 末端安装行波检测装置,然后分别在 $f_1 \sim f_8$ 处设置单相接地故障,将截取的行波信息进行S变换获得时频矩阵,以此建立不同故障馈线分支的数据对比库,对比库中为各典型支路电压零模行波S变换后的时频矩阵库 $E_{M \times N}$ 。 $M$ 为馈线数量, $N$ 为不同接地电阻的情况。

$$E_{M \times N} = \begin{bmatrix} E_1^1 & E_1^2 & \cdots & E_1^N \\ E_2^1 & E_2^2 & \cdots & E_2^N \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ E_M^1 & E_M^2 & \cdots & E_M^N \end{bmatrix} \quad (4)$$

根据波形相似度原理,当配电网发生单相故障时,通过各个馈线末端安装的行波检测装置测量得到的行波波形,进行相似度对比,确定故障所在支路。波形相似度计算公式为

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M E(i,j)Q(i,j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M E^2(i,j) \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M Q^2(i,j)}} \quad (5)$$

式中, $E(i,j)$ 为对比库中时频矩阵的第 $i$ 个频率的第 $j$ 个时间采样点的元素; $Q(i,j)$ 为发生故障时馈线终端测量的电压零模行波S变换后时频矩阵的第 $i$ 个频率的第 $j$ 个时间采样点的元素; $\rho$ 为2个矩阵之间的相似度,其值为 $[0,1]$ , $\rho$ 越接近1表示2个矩阵相似度越高。与对比库中对应支路时频矩阵的相似度越高,表明故障发生在此支路的可能性越大。

为了获取故障时频矩阵相似度数值的浮动区间,本文在配电网模型内的每个分支线路上按25 m的间隔设置采样故障点,以计算相似度。经过大量仿真和相似度对比,发现采样故障点发生在矩阵库中预设故障所在支路时,二者行波S变换时频矩阵之间的相似度均在0.80以上。考虑特殊情况,如故障初相角为0°或90°等,为保留一定阈值,设定相似度 $\rho \geq 0.85$ 时认定为高度相似,可判定为故障支路。部分故障采样计算结果如表1所示。

表1 相似度计算结果

Table 1 Similarity calculation results

故障点	所在支路		其他支路1		其他支路2	
	首端	末端	首端	末端	首端	末端
$f_1$	0.924	0.936	0.421	0.359	0.374	0.362
$f_2$	0.952	0.904	0.686	0.723	0.237	0.284
$f_3$	0.978	0.925	0.531	0.414	0.420	0.327
$f_4$	0.936	0.934	0.534	0.391	0.321	0.395
$f_5$	0.937	0.925	0.332	0.422	0.238	0.265
$f_6$	0.962	0.906	0.256	0.279	0.369	0.285
$f_7$	0.896	0.952	0.363	0.258	0.390	0.346
$f_8$	0.931	0.928	0.286	0.341	0.335	0.412

## 3 基于行波模量时间差的精确定位方法

在对比行波模时频矩阵相似度、确定故障馈线和分支后,即可针对故障所在支路的不同,设置合

适的定位方案来准确标定故障发生的位置,主要分为以下3种情况。

### 1) 故障位于主馈线。

当确定接地故障发生在主馈线上时,可通过馈线和相邻线路末端的行波检测装置测得线模行波的波头到达时刻,根据双端定位方法定位得到故障的准确发生位置,双端定位的公式为

$$d = \frac{1}{2} [(t_i - t_j)v + L_{ij}] \quad (6)$$

式中, $d$ 为故障点到第*i*条馈线末端检测点的距离; $t_i$ 、 $t_j$ 分别为第*i*、*j*条馈线终端记录到的行波到达时刻; $L_{ij}$ 为第*i*、*j*条馈线的长度之和; $v$ 为行波波速,双端定位中取线模行波进行定位,波速设定为 $2.986 \times 10^8$  m/s。

### 2) 故障位于一级分支。

当故障发生在馈线上的一级分支支路时,若根据双端定位公式计算,则仅能得到故障发生的分支节点,而无法准确得到故障在分支上的具体位置,且由于分支众多,单端定位难以识别故障点的第1次反射波头。因此,当故障发生在一级分支支路上时,可根据零模和线模行波波速差与故障位置的关系,得到故障位置与馈线末端行波测量装置的电气距离,从而推算得到故障在一级分支上的精确位置。

由于线模行波的波速几乎恒定而零模行波的波速随传播距离衰减较大,因此,本文根据零一线模波速差原理推导的改进双端定位<sup>[24]</sup>方法进行分支上的精确定位。改进的零一线模波速差原理的双端定位公式消除了零模波速不易确定的弊端,仅根据线模行波的波速以及零模和线模行波的到达时刻即可完成故障定位,定位公式为

$$d = \left| \frac{(t_{i1} - t_{i0})(t_{j1} - t_{j0})}{(t_{i0} - t_{j1}) - (t_{i1} - t_{j1})} v \right| \quad (7)$$

式中, $d$ 为计算得到的故障位置到第*i*条馈线末端检测点的电气距离; $t_{i1}$ 、 $t_{j1}$ 分别为第*i*、*j*条馈线末端的行波检测装置记录的线模行波到达时刻; $t_{i0}$ 、 $t_{j0}$ 分别为第*i*、*j*条馈线末端的行波检测装置记录的零模行波到达时刻; $v$ 为线模行波波速。

### 3) 故障位于二级分支。

当故障发生在馈线上的二级分支支路时,由于分支众多,产生的折反射复杂,可能会影响馈线末端行波检测装置测得的零模与线模行波的到达时间的准确标定。因此,在故障发生在二级分支的时

候,利用故障线路与相邻线路末端的行波检测装置根据改进双端定位计算,并引入分支少的健全线路末端行波检测装置利用单端定位进行定位计算,当两者之间的误差不大于给定误差时,则可准确测得故障点位置,单端定位公式为

$$d = \frac{1}{2} [(t_{i2} - t_{i1})v] \quad (8)$$

式中, $v$ 为线模行波波速; $t_{i2}$ 为第*i*条馈线末端测得的故障点反射行波到达时刻; $t_{i1}$ 为第*i*条馈线末端测得的初始故障行波到达时刻。

综上所述,根据行波模时频矩阵进行故障选线和精确定位的流程如图5所示。

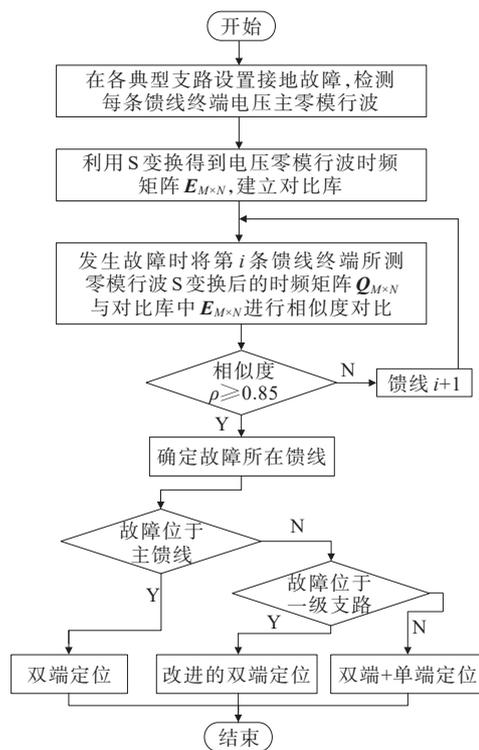


图5 故障选线和精确定位的流程

Figure 5 Flowchart for fault line selection and precise positioning

## 4 算例分析

在PSCAD/EMTDC中搭建35 kV配电网仿真模型,如图6所示。35 kV配电网采用4种不同供电方式的线路,分别为单一架空线、架空线与电缆混合以及存在一、二级分支支路的馈线,变压器变比为110 kV/35 kV,中心点的接地方式为经消弧线圈接地方式,过补偿度取8%,线路末端负载均使用 $200 + j12.282 \Omega$ 代替,母线及断路器等效电容均取 $2 \mu\text{F}$ 。配电网的线路参数如表2所示。

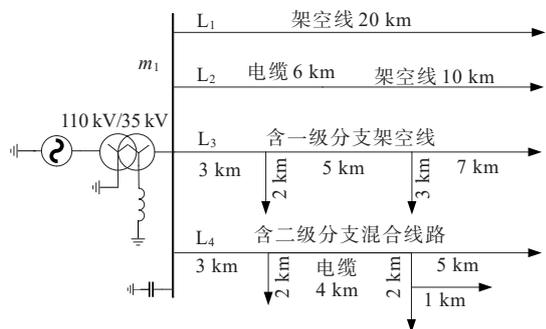


图6 35 kV配电网仿真模型

Figure 6 Simulation model of 35 kV distribution network

表2 配电网线路单位长度参数

Table 2 Unit length parameter of distribution network line

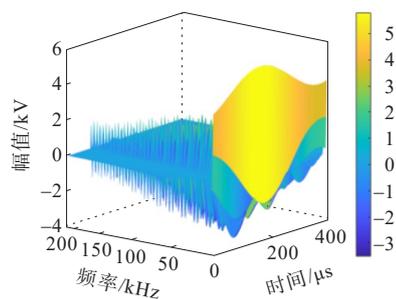
线路	电阻/ $(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$		电感/ $(\text{mH} \cdot \text{km}^{-1})$		电容/ $(\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1})$	
	正/负序	零序	正/负序	零序	正/负序	零序
架空线	0.172	0.231	1.210	5.475	0.009	0.006
电缆	0.270	2.721	1.019	0.255	0.339	0.280

在仿真中,行波检测装置的采样频率设置为1 MHz,考虑S变换的计算速度以及配电网的线路长度较短,行波的折反射情况复杂,截取200  $\mu\text{s}$ 时间窗的电压行波零模分量进行分析。

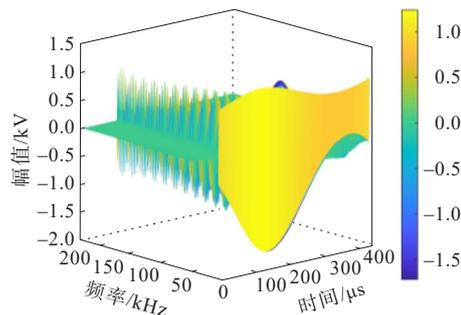
首先,按照图4中 $f_1 \sim f_8$ 各个典型故障支路位置,设置低、中、高阻3种情况下的单相接地故障,接地电阻分别为10、100、300  $\Omega$ 。各馈线末端安装行波检测装置采集零模电压行波进行S变换,并将3种接地电阻下各个典型支路故障S变换后的时频矩阵建立成对比库。然后,任意选取故障位置设置接地电阻,将馈线末端测得的电压零模行波S变换后的时频矩阵与对比库中的数据进行相似度对比,确定故障所在支路。

故障与正常馈线末端的电压零模行波时频如图7所示,对比不难发现,故障和正常馈线末端电压零模行波在高频分量部分存在较大差异,故障馈线高频部分明显大于正常馈线。因此,在与对比库中数据进行相似度对比时,计算波形的相关系数值会有较大差别,因而更易分辨故障支路。

本文针对不同的单相接地故障位置、接地电阻以及故障初相角等情况下设置故障,在大量的仿真分析后,不同故障点情况下得到的选线定位结果如表3所示;在故障位置相同的情况下,设置不同大小的接地电阻分析其对选线与定位的影响,如表4所示。根据表3、4仿真结果可知,本文所提方法能够准确判定配电网单相接地故障所在支路,并能够实现精准定位,定位误差不大于200 m。



(a) 故障馈线



(b) 正常馈线

图7 故障与正常馈线电压零模行波时频

Figure 7 Voltage zero-mode traveling wave time-frequency diagram of fault feeder and normal feeder

表3 不同故障位置的选线与定位结果

Table 3 Results of line selection and positioning for different fault locations

故障点	相似度	选线结果	定位误差/m
$f_1$	0.98	$L_1$	50.62
$f_2$	0.91	$L_{2-1}$	144.03
$f_3$	0.97	$L_2$	112.77
$f_4$	0.93	$L_{2-2}$	138.33
$f_5$	0.89	$L_{3-1}$	159.32
$f_6$	0.92	$L_3$	99.02
$f_7$	0.91	$L_{3-2}$	132.86
$f_8$	0.90	$L_{3-1-2}$	150.55

表4 不同接地电阻的选线与定位结果

Table 4 Results of line selection and positioning for different grounding resistors

故障点	接地电阻/ $\Omega$	相似度	选线结果	定位误差/m
$f_1$	3	0.98	$L_1$	80.82
	150	0.91	$L_1$	88.60
	500	0.97	$L_1$	93.55
$f_4$	3	0.93	$L_{2-2}$	136.42
	150	0.89	$L_{2-2}$	112.69
	500	0.92	$L_{2-2}$	158.31
$f_8$	3	0.91	$L_{3-1-2}$	147.43
	150	0.90	$L_{3-1-2}$	138.38
	500	0.90	$L_{3-1-2}$	158.85

由于配电网运行情况多变,本文将针对不同的网络运行情况,分析所提方法在不同运行情况下的适应性。

### 1) 中性点接地方式不同。

配电网中性点主要采取高阻接地、消弧线圈接地以及不接地3种方式,由于中性点接入设备不同会对行波到达母线处的折反射情况造成较大影响,因此需要深入分析。设置接地点为 $f_1$ 、 $f_4$ ,接地电阻为 $300\ \Omega$ ,初相角为 $15^\circ$ ,得到的定位情况如表5所示。

表5 中性点不同接地方式定位结果

Table 5 Positioning results of different grounding modes for neutral point

中性点接地类型	故障位置	相似度	选线结果	定位误差/m
高阻接地	$f_1$	0.96	$L_1$	88.82
	$f_4$	0.98	$L_{2-2}$	131.60
消弧线圈接地	$f_1$	0.91	$L_1$	93.55
	$f_4$	0.93	$L_{2-2}$	124.12
不接地	$f_1$	0.98	$L_1$	70.12
	$f_4$	0.99	$L_{2-2}$	101.31

### 2) 母线并联电容器不同。

由于负荷的随机波动,会引起配电网电压偏离额定值,一般采用无功功率就地补偿的方式在母线处并联电容器,补偿所需无功功率维持母线的电压稳定。并联定容的大小会对系统的谐振频率造成影响,从而影响行波高频分量。并联电容的影响如表6所示。

表6 不同母线并联电容的选线与定位结果

Table 6 Results of line selection and positioning for paralleled capacitors on different buses

并联电容/ $\mu\text{F}$	故障位置	相似度	选线结果	定位误差/m
无	$f_1$	0.96	$L_1$	84.32
	$f_4$	0.98	$L_{2-2}$	128.31
1	$f_1$	0.91	$L_1$	78.27
	$f_4$	0.93	$L_{2-2}$	116.21
2	$f_1$	0.98	$L_1$	84.12
	$f_4$	0.99	$L_{2-2}$	121.24

### 3) 截取零模电压行波时间窗不同。

行波时间窗大小决定了行波包含的故障数据多少,越大时间窗的零模电压行波在配电网中发生的折射与反射的情况越复杂,在与对比库中数据进行相似度计算时,不同时间窗电压零模行波S变换后的时频矩阵也会影响最终的结果。截取不同时间窗时进行选线和定位的结果如表7所示,分析可

知,当时间窗过小( $50\ \mu\text{s}$ )时,由于零模电压行波中包含的数据少,在与对比库进行对比时,可能会造成选线失败的情况。

表7 不同时间窗的选线与定位结果

Table 7 Results of line selection and positioning for different time windows

时间窗/ $\mu\text{s}$	故障位置	相似度	选线结果	定位误差/m
50	$f_1$	0.83	—	—
	$f_4$	0.86	$L_{2-2}$	137.21
100	$f_1$	0.88	$L_1$	87.55
	$f_4$	0.91	$L_{2-2}$	132.22
300	$f_1$	0.94	$L_1$	78.32
	$f_4$	0.93	$L_{2-2}$	123.12

## 5 结语

本文根据行波时频波形唯一性原理,利用单相接地故障的电压零模行波的时频矩阵与故障支路之间的对应关系形成判据,通过搭建对比库实现故障支路的确定。然后针对不同性质的故障支路,选取适用的行波定位计算方案,实现配电网单相接地故障的精确定位,在经过大量的仿真和计算后,得到如下结论:

1) 单相接地的故障电压零模行波中包含了丰富的故障特征信息,在进行S变换后得到的时频矩阵蕴含了行波的幅值、极性、相位以及频率等组成的高维特征量,根据时频矩阵能够更最大限度地利用行波的故障特征,实现故障支路的准确判定。

2) 本文提出的方法无须在全网设置行波检测装置,仅需在主馈线的首端和末端设置即可实现单相接地故障的精确定位,经济性较好;

3) 该算法不受接地电阻、初相角、中性点接地方式以及母线并联电容等因素的影响,并针对不同类型的故障分支采取对应的行波定位方案,减小了采用单一行波定位方案的误差,最大程度地利用了故障行波信息,适应性较强。

### 参考文献:

- [1] 肖白,束洪春,高峰,等.小电流接地系统单相接地故障选线方法综述[J].继电器,2001,29(4):16-20.  
XIAO Bai, SHU Hongchun, GAO Feng, et al. Survey of the methods of fault line selection for single-phase-to-earth fault in networks with ungrounded neutral[J]. Relay, 2001,29(4):16-20.
- [2] 齐郑,黄朝晖,陈艳波.基于零序分量的阻抗法配电网故

- 障定位技术[J].电力系统保护与控制,2023,51(6):54-62.
- QI Zheng, HUANG Chaohui, CHEN Yanbo. Impedance fault location technology for a distribution network based on a zero-sequence component[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 54-62.
- [3] 张慧芬,张帆,潘贞存.基于注入信号法的配电网单相接地故障自动定位算法[J].电力自动化设备,2008,28(6):39-43.
- ZHANG Huifeng, ZHANG Fan, PAN Zhengcun. Automatic fault locating algorithm based on signal injection method for distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(6): 39-43.
- [4] 洪亚,谭阳红,易汗林,等.配电网单相接地故障行波定位新方法[J].电力系统及其自动化学报,2017,29(2):14-20.
- HONG Ya, TAN Yanghong, YI Hanlin, et al. New method of single phase-to-ground fault location based on traveling wave in distribution networks[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(2): 14-20.
- [5] CHOI M S, LEE S J, LIM S I, et al. A direct three-phase circuit analysis-based fault location for line-to-line fault [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(4): 2541-2547.
- [6] SALIM R H, RESENER M, FILOMENA A D, et al. Extended fault-location formulation for power distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(2): 508-516.
- [7] 朱占春,潘宗俊,唐金锐,等.基于单端暂态能量谱相似性的配电网故障区段定位新方法[J].电力科学与技术学报,2021,36(2):180-191.
- ZHU Zhanchun, PAN Zongjun, TANG Jinrui, et al. A novel fault location method for power distribution systems using energy spectrum similarity analysis of single-terminal transient waveform[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(2): 180-191.
- [8] 梁英,杨嘉,李勤新,等.基于时频谱相似度的高压直流线路行波保护方法[J].电力科学与技术学报,2019,34(2):182-186.
- LIANG Ying, YANG Jia, LI Qinxin, et al. Traveling wave protection method for HVDC lines based on the time frequency spectrum similarity[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(2): 182-186.
- [9] 万信书,方连航,梁钰,等.基于三相电流幅值分析的小电流单相接地故障区段定位方法[J].电力科学与技术学报,2020,35(4):49-57.
- WAN Xinshu, FANG Lianhang, LIANG Yu, et al. Method of fault section location for the small current single-phase-to-ground fault based on the amplitude analysis of three-phase current[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(4): 49-57.
- [10] 杜刚,刘迅,苏高峰,等.基于FTU和"S"信号注入法的配电网接地故障定位技术的研究[J].电力系统保护与控制,2018,46(12):82-85.
- DU Gang, LIU Xun, SU Gaofeng, et al. Research on technology of grounding fault location combining FTU and "S" signal injecting method in distribution grid[J]. Power system protection and control, 2018, 46(12): 82-85.
- [11] 邓丰,李鹏,曾祥君,等.基于D-PMU的配电网故障选线和定位方法[J].电力系统自动化,2020,44(19):160-167.
- DENG Feng, LI Peng, ZENG Xiangjun, et al. Fault line selection and location method based on synchrophasor measurement unit for distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(19): 160-167.
- [12] 李冬梅,胡扬宇,王利利,等.基于改进注入法的直流配电网双端测距故障定位方法[J].智慧电力,2019,47(12):110-116.
- LI Dongmei, HU Yangyu, WANG Lili. Double-end distance measurement fault location method for DC distribution network based on improved injection method [J]. Smart Power, 2019, 47(12): 110-116.
- [13] 史可鉴,陈刚,吴建军,等.基于行波信号注入的配网线路单相故障状态接地诊断方法[J].电网与清洁能源,2022,38(2):82-87.
- SHI Kejian, CHEN Gang, WU Jianjun, et al. A single phase grounding fault state diagnosis method for distribution network lines based on traveling wave signal injection[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(2): 82-87.
- [14] 韦翔,梁艳,郭立,等.基于Lambda算法的配电网故障定位方法研究[J].电测与仪表,2022,59(12):71-76.
- WEI Xiang, LIANG Yan, GUO Li, et al. Research on fault location method of distribution network based on Lambda algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(12): 71-76.
- [15] 唐金锐,尹项根,张哲,等.零模检测波速度的迭代提取及其在配电网单相接地故障定位中的应用[J].电工技术学报,2013,28(4):202-211.
- TANG Jinrui, YIN Xianggen, ZHANG Zhe. Iterative extraction of detected zero-mode wave velocity and its application in single phase-to-ground fault location in distribution networks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4): 202-211.
- [16] 张帆,潘贞存,马琳琳,等.基于模量行波传输时间差的线路接地故障测距与保护[J].中国电机工程学报,2019,29(10):78-83.
- ZHANG Fan, PAN Zhengcun, MA Linlin, et al. Transmission line fault location and protection based on the gap between zero mode and aerial mode traveling wave propagation time[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 29(10): 78-83.
- [17] 秦苏亚,薛永端,刘砾钰,等.有源配电网小电流接地故

- 障暂态特征及其影响分析[J]. 电工技术学报,2022,37(3):655-666.
- QIN Suyu, XUE Yongduan, LIU Yizheng, et al. Transient characteristics and influence of small current grounding fault in active distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(3): 655-666.
- [18] 刘晓琴,王大志,江雪晨,等. 利用行波到达时差关系的配电网故障定位算法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 4109-4115.
- LIU Xiaoqing, WANG Dazhi, JIANG Xuechen, et al. Fault location algorithm for distribution power network based on relationship in time difference of arrival of traveling wave[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 4109-4115.
- [19] 王阳,曾祥君,黎锐烽,等. 基于图论的配电网故障行波定位新算法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 143-147.
- WANG Yang, ZENG Xiangjun, LI Ruifeng, et al. A traveling wave fault location algorithm for distribution network based on graph theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 143-147.
- [20] 曹璞璘,申忠友,束洪春,等. 基于波形突变特征的海量行波数据中雷击干扰波形辨识[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(17): 178-186.
- CAO Pulin, SHEN Zhongyou, SHU Hongchun, et al. Identification of lightning interference waveforms in massive traveling wave data based on waveform mutation characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(17): 178-186.
- [21] 穆利智,李泽文,吕佳佳,等. 结合 EMD-WVD 和布谷鸟搜索算法的输电线路故障暂态保护[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(16): 137-144.
- MU Lizhi, LI Zewen, LÜ Jiajia, et al. Transient protection for transmission line fault combining empirical mode decomposition-wigner ville distribution and Cuckoo search algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(16): 137-144.
- [22] 李浩,张禄亮,麦章渠,等. 基于改进离散型麻雀搜索算法的配电网恢复重构方法[J]. 智慧电力, 2023, 51(7): 16-22+30.
- LI Hao, ZHANG Luliang, MAI Zhangqu, et al. Distribution network recovery reconfiguration method based on improved discrete sparrow search algorithm[J]. Smart Power, 2023, 51(7): 16-22+30
- [23] 殷浩然,苗世洪,郭舒毓,等. 基于S变换相关度和深度学习的配电网单相接地故障选线新方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(7): 88-96.
- YIN Haoran, MIAO Shihong, GUO Shuyu, et al. Novel method for single-phase grounding fault line selection in distribution network based on S-transform correlation and deep learning[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(7): 88-96
- [24] 谢李为,李勇,罗隆福,等. 基于距离矩阵与分支系数的配电网故障定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(7): 2180-2191.
- XIE Liwei, LI Yong, LUO Longfu, et al. Fault location method for distribution networks based on distance matrix and branch coefficient[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2180-2191.

(上接第 83 页 Continued from page 83)

- [10] 闫晨光,张芑,徐雅,等. 换流变压器有载分接开关级间短路故障差动保护动作特性[J]. 电工技术学报, 2023, 38(21): 5878-5888+5912.
- YAN Chenguang, ZHANG Peng, XU Ya, et al. Differential protection performance for converter transformer intertap short-circuit faults in on-load tap changers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(21): 5878-5888+5912.
- [11] 栾洪洲,殷伟,周飞,等. 直流控保设备互感器数据异常快速识别策略[J]. 电网技术, 2019, 43(8): 2853-2859.
- LUAN Hongzhou, YIN Wei, ZHOU Fei, et al. A fast recognition strategy for abnormal transformer data in DC protection and control device[J]. Power System Technology, 2019, 43(8): 2853-2859.
- [12] 安海清,李振动,金海望,等. 张北柔直电网直流分压器二次电压测量异常引起误闭锁机理分析及改进措施[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(8): 156-160+168.
- AN Haiqing, LI Zhendong, JIN Haiwang, et al. Mechanism analysis and improvement measures of error block caused by abnormal secondary voltage measurement of DC voltage divider in Zhangbei flexible DC grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(8): 156-160+168.
- [13] 韩平平,陈思远,张楠,等. 考虑分布式光伏的低压台区线损异常辨识方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(8): 140-148.
- HAN Pingping, CHEN Siyuan, ZHANG Nan, et al. Line loss anomaly identification method for low-voltage station area considering distributed PV[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(8): 140-148.
- [14] 贾梦瑶,王玉玮,宋明浩. 基于时间生成对抗网络的风电随机场景预测[J]. 智慧电力, 2023, 51(8): 59-66.
- JIA Mengyao, WANG Yuwei, SONG Minghao. Stochastic scenario prediction of wind power based on time generative adversarial networks[J]. Smart Power, 2023, 51(8): 59-66.
- [15] FAWCETT T. An introduction to ROC analysis[J]. Pattern Recognition Letters, 2006, 27(8): 861-874.