

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240075

## 基于多元暂态特征故障度的配电网单相接地选线方法

邓祥力<sup>1</sup>, 赵磊鑫<sup>1</sup>, 熊小伏<sup>2</sup>, 胡海洋<sup>2</sup>, 刘大为<sup>3</sup>

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2. 重庆大学电气工程学院, 重庆 400044;  
3. 国网宿松供电公司, 安徽 安庆 246500)

**摘要:** 针对配电网发生单相接地故障时电流较弱、故障条件复杂、现有的故障检测技术性能不可靠的问题, 提出一种利用基频移频的多元暂态特征故障度配电网单相接地选线方法。为了保留暂态特征的全景性, 去除暂态零序电流中的基频分量, 采用希尔伯特变换对暂态零序电流解析信号进行计算。之后, 引入位移因子去除基频, 保留所有的瞬态特征, 并计算了3种典型瞬态特征指标。最后, 采用 Copula 计算瞬态特征随机变量的联合分布密度函数并计算各线路的故障度, 选择故障程度最大的馈线作为故障馈线。建立不同故障条件下的径向配电网样本模型、电弧故障模型以及风机和光伏模型的 IEEE 34 节点测试系统, 验证了所提方法的有效性。

**关键词:** 故障选线; 基频移频; Copula 函数; 概率密度; 多元暂态特征故障度

### A single-phase grounding line selection method for a distribution network based on multivariate transient characteristic fault degree

DENG Xiangli<sup>1</sup>, ZHAO Leixin<sup>1</sup>, XIONG Xiaofu<sup>2</sup>, HU Haiyang<sup>2</sup>, LIU Dawei<sup>3</sup>

(1. School of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;  
2. School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. State Grid  
Susong County Power Supply Company, Anqing 246500, China)

**Abstract:** When a single-phase ground fault occurs in a distribution network, the current is weak, the fault conditions are complex, and the performance of the existing fault detection techniques is unreliable. Thus this paper proposes a multivariate transient characteristic fault degree distribution network single-phase ground routing method using fundamental frequency shift. To retain the panoramic nature of transient features, the fundamental frequency component in the transient zero-sequence current is removed, and the Hilbert transform is used to calculate the transient zero-sequence current resolved signals. Then, a displacement factor is introduced to remove the fundamental frequency to retain all the transient features. Next, three typical transient feature metrics are calculated. Finally, a Copula is used to compute the joint distribution density function of the transient feature random variables and to calculate the fault degree of lines, and select the feeder with the largest fault degree as the faulty feeder. The effectiveness of the proposed methodology is verified by setting up a radial distribution network sample model, the arc fault model, and the IEEE 34-bus test system for the wind turbine and photovoltaic models in different fault conditions.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52277079).

**Key words:** fault line selection; fundamental frequency shift; Copula function; probability density; multivariate transient characteristic fault degree

## 0 引言

单相接地故障占配电网故障的80%以上, 需对

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(52277079); 中国南方电网公司科技项目资助(CGYKJXM20220115)

故障线路进行识别, 以便尽快退运故障线路。目前, 诸多可再生能源(如风能和太阳能)已大规模接入配电网<sup>[1]</sup>, 配电网接地故障的识别已成为保证电网正常运行、设备和人员安全的重要课题。由于接地零序电流的幅值较小, 故障条件复杂, 现有的选线装置无法准确识别接地故障线路<sup>[2]</sup>。

现有的配电网小电流接地选线方法主要有稳态选线方法<sup>[3-6]</sup>和暂态选线方法。稳态选线方法容易受到某些运行条件的影响,如电网运行方式和消弧线圈、接地电阻等。

与稳态方法相比,暂态方法通常利用一些现代信号处理算法提取接地电流的暂态故障特征,能够提高接地选线的准确度,如小波变换<sup>[7-9]</sup>、s变换<sup>[10]</sup>、聚类方法<sup>[11-12]</sup>等。文献[7]将各馈线暂态零序电流进行小波分解,分别计算低频分量和高频分量能量,依据小波能量极大值法进行故障选线。由于 Hausdorff 距离算法对于微弱信号的差异判别具有显著优势,文献[8]通过提取零序电流的 5、7 次谐波分量,利用各线路间的电流差异进行构造选线方案。此外,文献[9]不直接采用小波变换结果进行选线判据的构造,而是先对各出线暂态零序电流和母线差分零模电压作交叉小波变换,将得到的相关性强和相位差稳定的区域作为选线时频窗的选择依据,进而提出一种基于特征频带暂态无功功率的选线方法,能够很好地适应高阻故障且不受故障起始角的影响。与稳态方法相比,这些基于小波变换的暂态方法具有更高的精度,但检测精度严重依赖于母小波函数,这意味着小波函数对检测结果有显著影响。文献[10]通过 s 变换求取特征频率,利用零序电流在特征频率及工频上方向不同的特征,结合相应频率的零序电压,构建综合特征频率和工频零序导纳向量相角差的判据进行选线。文献[11]通过变分模态分解 (variational mode decomposition, VMD) 得到本征模态函数,对其低频分量进行相关性计算,高频分量进行初始极性计算,构造二维平面散点图,通过 K-means++ 检测散点分布进行故障选线。文献[12]将 VMD 与 FFT 相结合,分离零序电流中的工频分量和噪声信号,利用得到的暂态非工频分量通过免阈值设定的 K-means 算法实现故障选线。对于聚类方法,如果事先能收集到足够的故障数据,则检测精度会很高。然而,收集所有故障样本是不现实的,并且聚类方法耗时长。

随着配电网故障选线理论研究的深入、信息分析处理技术的不断进步,以及配网馈线自动化进程的不断推进,许多专家学者提出了结合多种选线原理的综合式选线方法,即综合多个传统选线方法,如:基于数据挖掘的选线方法<sup>[13]</sup>;基于神经网络的选线方法<sup>[14-16]</sup>;基于支持向量机的选线方法<sup>[17]</sup>;基于模糊理论的选线方法<sup>[18-19]</sup>等。基于人工智能将多判据的融合选线方法应用到故障选线中,实现对故障线路的选择,然而需要建立充足的样本训练库进行训练,增加了选线难度。

从以上文献分析可以看出,基于暂态故障特征的选线方法有两点还不够完善:

1) 有限零序接地电流故障特征的提取,大多局限于部分频段或局部特征,缺乏暂态特征的“全景”性,对接地电流的暂态特征提取不够充分;

2) 多特征的融合判据未考虑接地过程中新能源输出电流暂态分量的随机性,以及故障点接地电阻和电弧随机性对接地电流暂态特征的影响,缺乏考虑随机因素的线路接地故障度的评判标准及融合方法。

本文从配电网故障的数学模型入手,利用希尔伯特变换和频移因子,通过基频移频算法对故障特征信号进行处理,获取接地电流暂态电流“全景”波形,并计算暂态能量相对熵、峭度、距离相似度等暂态特征,利用 Copula 函数计算暂态特征的概率密度函数,构建考虑随机因素影响的多元暂态故障特征的配电网选线方法,最后搭建包含新能源及电弧模型的辐射型配电网对本文所提故障选线判据进行了验证。

## 1 接地故障暂态电流特征分析

谐振接地系统电流故障原理图如图 1 所示。假设其具有  $n$  条馈线,其中馈线  $k$  发生单相接地故障,接地电阻为  $R_g$ 。设感性补偿电流的相角与容性电流同向,消弧线圈的补偿电感电流  $I_L$  与各馈线的零序电流  $i_{0n}$  流向如图 1 所示,其中,  $R_{0n}$ 、 $L_{0n}$ 、 $C_{0n}$  ( $n=1,2,\dots$ ) 分别为各馈线电阻、电感、电容。由图 1 可构建出谐振接地系统的暂态等值电路,其拓扑如图 2 所示,其中:  $U_0$  为发生故障时所产生的零序电压;  $R_p$ 、 $L_p$  分别为消弧线圈的等值电阻与等值电感;  $R_{0\Sigma}$ 、 $L_{0\Sigma}$ 、 $C_{0\Sigma}$  分别为系统的等值电阻、等值电感与等效电容。

谐振接地的暂态零序电流实际是线路电容放电产生的。消弧线圈一般采用过补偿方式,其在高频瞬态期间补偿原始暂态零序电流的影响较小。电容电流  $I_C$  由高频衰减分量  $I_{C,HC}$  与工频分量  $I_{C,FC}$  组成,消弧线圈的电感电流  $I_L$  由直流衰减分量  $I_{L,DC}$  与工频分量  $I_{L,FC}$  组成。

$$I_C = I_{C,HC} + I_{C,FC} = I_{Cm} \left\{ \begin{array}{l} \cos(\omega t + \varphi) + \\ e^{-\frac{t}{\tau_c}} \left[ \frac{\omega_f}{\omega} \sin \varphi \sin \omega_f t - \cos \varphi \cos \omega_f t \right] \end{array} \right\} \quad (1)$$

$$I_L = I_{L,DC} + I_{L,FC} = -I_{Lm} \left[ \cos(\omega t + \varphi) + e^{-\frac{t}{\tau_L}} \cos \varphi \right] \quad (2)$$

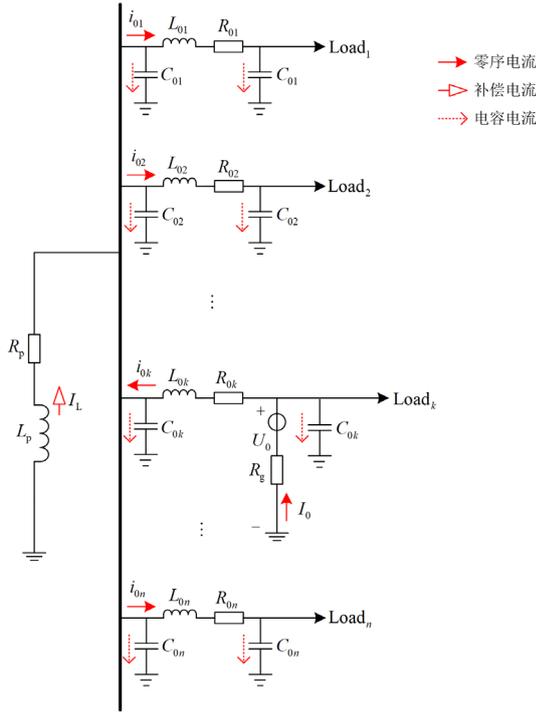


图 1 谐振接地系统电流故障原理图

Fig. 1 Resonant grounding system current fault schematic

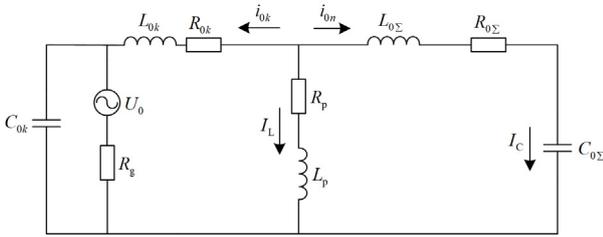


图 2 暂态零序等值电路

Fig. 2 Transient zero-sequence equivalent circuit

式中:  $I_{Cm}$ 、 $I_{Lm}$  分别为系统发生故障时流经故障点的电容电流和电感电流的幅值;  $\omega$  为系统工频角频率;  $t$  为从故障时刻起所经历的时间;  $\varphi$  为故障发生前瞬间故障相电压的初始相角;  $\tau_c$ 、 $\tau_L$  分别为暂态零序等值电路中容性、感性回路的衰减时间常数;  $\omega_f$  为暂态电容电流自由谐振频率。

故障电流  $I_f$  是式(1)和式(2)所示电容电流  $I_C$  和电感电流  $I_L$  之和。

$$I_f = (I_{Cm} - I_{Lm}) \cos(\omega t + \varphi) + I_{Cm} \left[ \frac{\omega_f}{\omega} \sin \varphi \sin \omega_f t - \cos \varphi \cos \omega_f t \right] e^{-\frac{t}{\tau_c}} + I_{Lm} \cos \varphi e^{-\frac{t}{\tau_L}} \quad (3)$$

消弧线圈的过补偿会对稳态故障特征量产生极大影响, 对小电流接地故障特征的识别和检测产生

不利影响。因此, 考虑提取故障接地电流的暂态分量进行故障检测。

由式(3)可知, 故障电流由直流衰减分量、工频交流分量、高频衰减分量 3 部分组成。健全馈线电流由高频衰减分量组成, 无直流分量; 而故障馈线电流由阻尼直流分量以及衰减分量组成, 且相较于健全馈线, 故障馈线中存在衰减的基频分量, 因此故障发生初期衰减的基频分量对故障暂态特征的提取存在一定影响, 此外, 故障电流的衰减时间极为短暂, 瞬态特征分量的提取受到基频分量的干扰, 在高阻接地故障中尤为明显。因此, 特别在高阻接地的情况下, 需要一种将衰减工频分量滤除的全故障特征提取的方法。

## 2 移频法

### 2.1 移频法原理

故障相角不同导致故障电流各分量比例不同, 当故障相角在  $0 \sim 90^\circ$  内变化时, 直流分量与高频分量的幅值大小具有根据故障相角变化的互补特性。针对高频暂态故障特征分析, 由于消弧线圈采取过补偿方式, 故障电流呈现容性特征, 感性分量微弱、快速衰减。此时, 式(3)可以近似为式(4)。

$$I_f(t) = (I_{Cm} - I_{Lm}) \cos(\omega t + \varphi) + I_{Cm} \frac{\omega_f}{\omega} \sin \varphi e^{-t/\tau_c} \cdot \sin \omega_f t - I_{Cm} \cos \varphi e^{-t/\tau_c} \cdot \cos \omega_f t \quad (4)$$

式(4)中, 故障电流可视为中心角频率为  $\omega$  的带通信号。对其进行三角函数变换, 得到

$$I_f(t) = x_{LB} \cos(\omega t) - x_{IB} \sin(\omega t) + x_{LD} \cos(\omega t) - x_{ID} \sin(\omega t) \quad (5)$$

式中:  $x_{LB}$ 、 $x_{LD}$  为消弧线圈补偿项;  $x_{IB}$ 、 $x_{ID}$  为暂态信息项。

$$\begin{cases} x_{LB} = (I_{Cm} - I_{Lm}) \cos \varphi \\ x_{IB} = (I_{Cm} - I_{Lm}) \sin \varphi \\ x_{LD} = I_{Cm} \left[ \frac{\omega_f}{\omega} \sin \varphi \sin(\omega_f t - \omega t) - \cos \varphi \cos(\omega_f t - \omega t) \right] \cdot e^{-t/\tau_c} \\ x_{ID} = I_{Cm} \left[ \frac{\omega_f}{\omega} \sin \varphi \cos(\omega_f t - \omega t) - \cos \varphi \sin(\omega_f t - \omega t) \right] \cdot e^{-t/\tau_c} \end{cases} \quad (6)$$

引入满足线性变换与微分性质的函数  $F(x)$  对式(5)进行解析, 现有  $F(x)$  有 Hilbert 变换、微分变换、积分变换, 考虑仿真精度的影响, 采用 Hilbert 变换将式(5)转化到复数域, 如式(7)所示。

$$\tilde{I}_f(t) = (x_{LB} + jx_{IB}) \cdot (\cos(\omega t) + j\sin(\omega t)) + (x_{LD} + jx_{ID}) \cdot (\cos(\omega t) + j\sin(\omega t)) \quad (7)$$

移频法的本质是将复数信号乘以旋转信号，为避免基频分量对故障特征的干扰，引入旋转信号  $e^{-j\omega t}$ ，消除式(7)中的基频分量，得到复包络信号。

$$S[\tilde{I}_f(t)] = \tilde{I}_f(t) \cdot e^{-j\omega t} = [x_{LB}(t) + jx_{IB}(t)] + [x_{LD}(t) + jx_{ID}(t)] \quad (8)$$

从式(8)可以得到经基频移频后的信号，实现了对基频分量的滤除，其实部可近似为变换后的信号，将式(6)各项参数代入式(8)，得到故障馈线经基频移频后的全特征信号。

$$I'_f(t) = (I_{Cm} - I_{Lm}) \cos \varphi + I_{Cm} \frac{\omega_f}{\omega} \sin \varphi \sin(\omega_f t - \omega t) e^{-t/\tau_c} - I_{Cm} \cos \varphi \cos(\omega_f t - \omega t) e^{-t/\tau_c} \quad (9)$$

式中， $I'_f(t)$  为故障电流的全特征暂态电流。

### 2.2 移频法性能检测

为检测基频移频法对故障波形的处理效果，利用理想信号检测方法性能，构造含有基频电流、整数次谐波电流、非整数次谐波电流、直流电流分量的理想信号  $i(t)$ ，如式(10)所示。

$$i(t) = 5 \cos(2\pi \times 50t + 30^\circ) + 20e^{-20t} \cos(2\pi \times 200t) + 100e^{-50t} \cos(2\pi \times 335t) + 5e^{-5t} \quad (10)$$

理论上，理想信号经由上述信号处理方法所得信号  $i'(t)$  为

$$i'(t) = 5 \cos(30^\circ) + 20e^{-20t} \cos(2\pi \times 150t) + 100e^{-50t} \cos(2\pi \times 285t) + 5e^{-5t} \cos(2\pi \times 50t) \quad (11)$$

采用本文所述信号处理方法对式(10)的理想信号进行处理，理想效果、基频移频法、VMD 法、陷波器处理所得效果如图 3 所示。可见，基频移频法与理想效果之间的曲线基本一致，说明基频移频法是有效的。随着电网智能化发展，电力电子设备大规模应用以及新能源并网，导致配网电流谐波含量较多。对比 VMD 方法与理想效果之间的曲线，当含有谐波时，VMD 等信号分析方法不适合提取“全景”故障特征；陷波器则会引入一定的相位延迟或者提前，并且造成能量缺失。

以下文的径向配电网为例，接地电阻为  $100 \Omega$ ，故障初始角为  $45^\circ$ ，原始的暂态零序电流如图 4(a)所示。通过基频移频法处理后的全特征信号如图 4(b)所示。

由图 4 可以看出，基频移频法有效滤除了基频分量，并且保留了暂态分量中的主要故障瞬态特征，如初始暂态幅值和相角。移频操作后，有效消除了基频分量对暂态故障特征的影响，因此可以根据处

理后的暂态分量来构造选线准则。

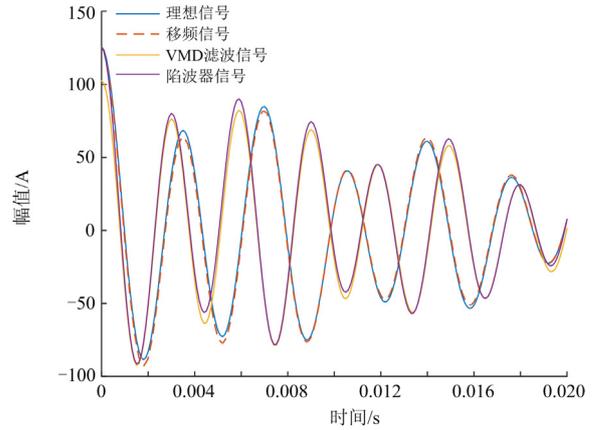
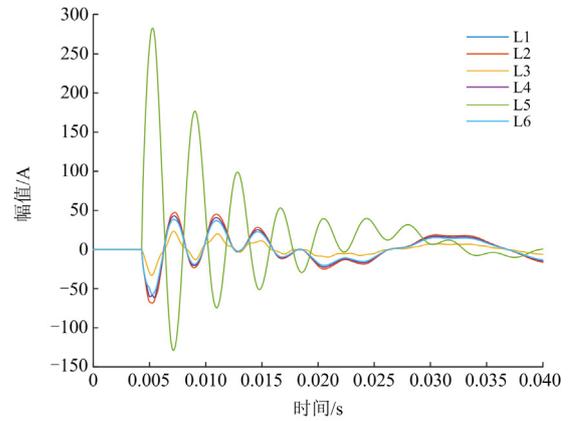
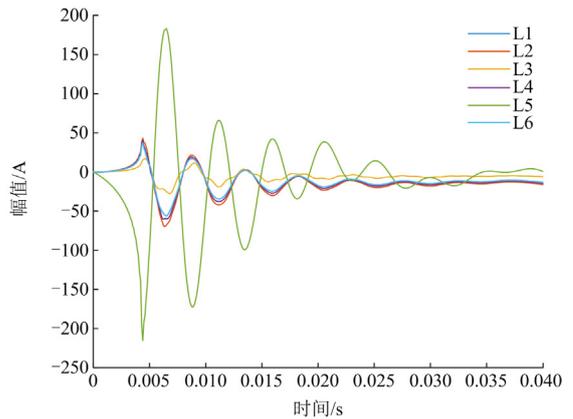


图 3 理想信号移频法效果图

Fig. 3 Effect diagram of ideal signal frequency shifting method



(a) 原始的暂态零序电流



(b) 经基频移频法处理后的信号

图 4 故障信号基频移频法效果图

Fig. 4 Effect diagram of fault signal fundamental frequency shift method

### 3 多元暂态特征故障度的选线判据

经消弧线圈补偿的小电流接地系统发生单相接

地故障时, 故障暂态电流会受到接地点电弧、接地电阻等随机因数的影响。同时, 配电网中大量光伏、风机等新能源系统的接入, 故障暂态电流还会受到控制策略、环境、运行状态等随机因素的影响。因此, 建立反映随机变量影响的故障特征指标, 计算线路故障度, 可提高选线的准确性。

### 3.1 故障检测指标

#### 3.1.1 峭度指标

故障时刻零序电流变化近似认为一个冲击信号, 峭度可以反映一个冲击信号的突变程度, 由图 4 可见, 故障瞬间故障馈线的峭度值大于健全馈线, 离散信号的峭度值可由式(12)计算。

$$k_n = \frac{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (i_{nj} - \bar{i}_{nj})^4}{\left( \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (i_{nj} - \bar{i}_{nj})^2 \right)^2} \quad (12)$$

式中:  $k_n$  为第  $n$  条馈线的峭度值;  $i_{nj}$  为第  $n$  条馈线  $j$  时刻的电流幅值;  $\bar{i}_{nj}$  为  $i_{nj}$  的均值。

#### 3.1.2 暂态能量相对熵

故障馈线的零序电流的瞬态衰减分量幅值大于健全馈线。理论上, 故障馈线的瞬态能量也大于健全馈线的瞬态能量。因此, 线路的暂态能量可以作为故障选线的第二故障指标。

通过基频移频法后得到的各分支全特征故障信息, 提取零序电流暂态衰减特征量, 求取其暂态能量相对熵, 具体计算方法为

$$\begin{cases} E_m = \int_{T_0}^{T_0+T/10} i_r^2(t) dt \\ E_{mm} = |E_m \ln E_n / E_m| \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $E_m$  为第  $m$  条馈线所含暂态能量值;  $E_{mm}$  为第  $m$  条馈线相对于第  $n$  条馈线的暂态能量相对熵。

#### 3.1.3 综合相似系数

故障初相角和消弧线圈都会影响暂态电流的幅值, 并且考虑测量误差、噪声、谐波干扰的影响, 故障馈线中存在故障电流小于健全馈线电流的情况。因此, 幅值相关指标不能准确定位故障馈线, 为获取准确检测结果, 利用 Hausdorff 距离算法对波形差异敏感度的优越性以及谐振接地配电网单相接地故障时线路之间微弱的电流波形差异进行提取和识别, 构造相应的故障选线判别方案。因此, 线路间的相似度可以作为故障选线的第三故障指标。

针对连接于同一母线的线路, 故障线路与健全线路的零序电流暂态衰减量作为 Hausdorff 距离算法的自变量点集  $A$ 、 $B$ 。求其 Hausdorff 距离, 得到

$$H(A, B) = \max(H_{A-B}, H_{B-A}) \quad (14)$$

式中,  $H_{A-B}$  是点集  $A$  相对于点集  $B$  的欧式距离。

$H(A, B)$  能体现出两个点集  $A$ 、 $B$  间的整体差异。 $H(A, B)$  值越大, 表明两条馈线间的差异越明显, 反之, 说明两条馈线间的相似度越高。

求取各线路的综合相似系数  $H_n$  作为选线第三判据, 第  $n$  条线路的综合相似系数为

$$H_n = \frac{1}{N-1} \left( \sum_{m=1}^N H_{mn} - H_{mn \max} \right) \quad (15)$$

式中:  $H_n$  为第  $n$  条馈线的综合相似度系数;  $H_{mn}$  为线路  $n$  相对于线路  $m$  暂态电流的 Hausdorff 距离相似度;  $H_{mn \max}$  为第  $n$  条线路相对于所有线路间的最大 Hausdorff 距离。

### 3.2 利用 Copula 函数计算线路故障度联合概率分布

若单相接地故障事件被视为随机可能性事件, 则可以通过计算每个馈线的故障可能性来检测故障馈线。上述 3 个故障指标实际上反映了 3 种不同的故障特征: 峭度指标描述波形突变量; 暂态能量相对熵描述衰减暂态分量的瞬时值; 距离相似度描述电流波形间相似度。Copula 函数可以提供 3 种不同指标的线性组合, 并且不会丢失有效故障特征。

Copula 函数是一个多元累积分布函数(cumulative distribution function, CDF), 即通过 Sklar 定理将多个变量的边缘分布刻画为一个多元随机变量的联合分布。假设  $X_1, X_2, \dots, X_N$  为  $N$  个随机变量,  $F_1(X_1), F_2(X_2), \dots, F_N(X_N)$  为  $N$  个随机变量的边缘分布, 由 Sklar 定理可得其联合概率分布为

$$F_X(x_1, \dots, x_N) = C_X[F_1(X_1), \dots, F_N(X_N)] \quad (16)$$

式中,  $C_X(\cdot)$  为 Copula 函数, 本质上是  $[0,1]^n$  上的一个联合分布函数。

本文拟采用半参数 Copula 模型, 利用电缆线路、架空线路、混合线路各种故障情景下的 3 种故障参数分别进行函数拟合, 通过贝叶斯信息准则 (Bayesian information criterion, BIC) 选取适宜的半参数模型。

若用  $c_k(\cdot)$  表示 Copula 函数  $C_k(\cdot)$  的密度, 给定一个模型  $k$ , 其 BIC 表示为

$$B_{IC}(k) = -2 \sup_{\theta_k \in \Theta_k} \sum_{n=1}^N \log c_k(\hat{F}_1(X_1), \dots, \hat{F}_n(X_n), \theta_k) + d_k / \log(N) \quad (17)$$

式中:  $d_1, \dots, d_k$  为变量拟合值;  $\hat{F}_1(X_1), \dots, \hat{F}_n(X_n)$  为拟合参数的边缘分布, 使得 BIC 最小的模型即最优

Copula 函数。参数估计的边界条件为  $\{c(\cdot, \theta); \theta \in \Theta \subset \mathbf{R}\}$ ，此时，通过最大半参数对数来近似耦合模型的参数  $\theta$ 。

$$\hat{\theta} = \arg \sup_{\theta \in \Theta} \sum_{n=1}^N \log c(\hat{F}_1(X_1), \dots, \hat{F}_n(X_n), \theta) \quad (18)$$

根据式(18)求取各种不同线路类型的参数值，对其进行均值化处理得到最终适用于所有情景的 Copula 参数值。

在单相接地故障中，馈线故障的概率可转化为求取三故障指标联合概率分布。

针对故障选线问题，各暂态特征可根据式(12)、式(13)和式(15)来计算各特征的边缘分布函数值，并进行归一化处理，继而利用式(16)计算最终的多元暂态特征故障度，构造多元暂态特征故障度矩阵。

最终，故障检测标准是将多元暂态特征故障度最高的馈线视为故障馈线，其余馈线视为健全馈线。

### 3.3 基于暂态特征故障度的选线判据

#### 3.3.1 选线方法

在故障检测之前，应首先假定线路出现接地故障。可监测零序电压瞬时值确定，若测量的零序电压满足式(19)，可以进行故障选线检测。

$$U_0 \geq qU_N \quad (19)$$

式中： $U_N$  为线路额定电压；本文中  $q$  设置为 10%。

当检测到单相接地故障时，保护将启动以激活所提出的检测方法。在计算过程中，会对时间进行计数，通过计算  $[T_0, T_0 + T/10]$  周期内的故障指标进行故障馈线监测。利用 Copula 理论求取多元暂态特征故障度确定故障馈线，形成多随机变量融合的综合选线判据。具体实现步骤如下：

由式(12)一式(15)分别计算各馈线的峭度指标  $k_n$ 、暂态能量相对熵  $E_{mn}$ 、综合相似系数  $H_n$ ，对故障指标分别进行归一化处理，并将处理后指标代入式(16)，将故障测度最大值所对应的馈线判定为故障馈线。

#### 3.3.2 选线流程

所提出的经消弧线圈接地系统故障选线方案流程图如图 5 所示。

Step1 读取采集到的母线电压及各馈线首端零序电流；

Step2 根据读取的母线电压判断是否满足启动逻辑，若满足则进行选线，否则返回上一步；

Step3 对各馈线首端零序电流进行信号处理，计算故障测度指标峭度指标、暂态能量相对熵、综合相似系数，并求取其相对应的概率指标；

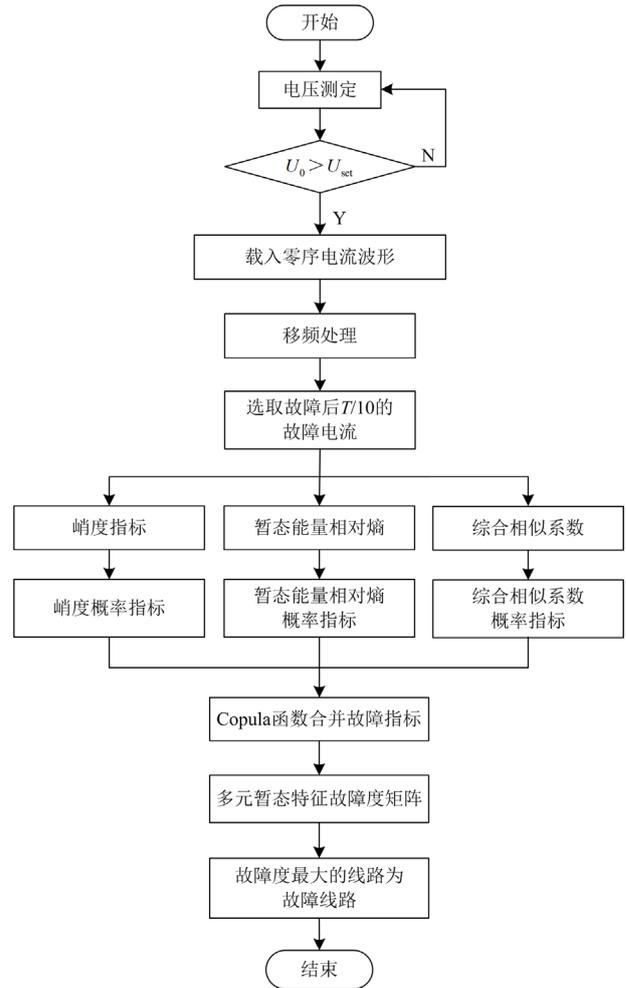


图 5 经消弧线圈接地故障选线流程图

Fig. 5 Flow chart of grounding fault selection via arc-cancelling coil

Step4 根据 Copula 理论计算多元暂态特征故障度矩阵，将故障度最大的馈线判定为故障馈线，根据选线结果发出断路器跳闸信号。

## 4 仿真验证

### 4.1 模型搭建

随着可再生能源的发展，分布式能源(DG)接入到配电网给故障选线带来了新的挑战。因此，在 PSCAD 中建立了典型的 6 条馈线和 2 个 DG 的径向配电网模型，如图 6 所示。DG<sub>1</sub> 为风电场，DG<sub>2</sub> 为光伏电场，两者通过开关继电器 S<sub>1</sub>、S<sub>2</sub> 连接至辐射型配电网，且 DG 控制策略均考虑低电压穿越影响。线路参数如表 1 所示。消弧线圈采用 10%过补偿方式，则消弧线圈参数电感  $L_p = 0.3481 \text{ H}$ 、电阻  $R_p = 20 \Omega$ ；采样频率为 10 kHz。

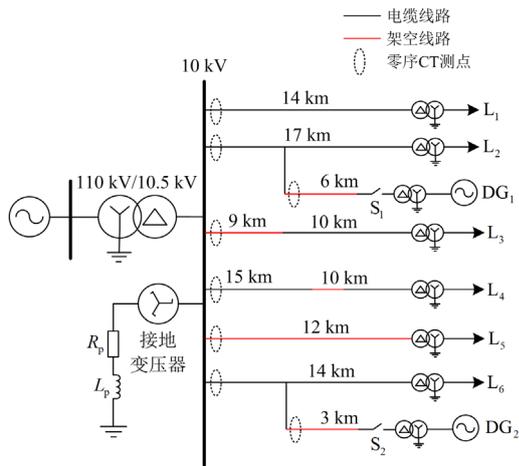


图 6 径向配电网模型

Fig. 6 Radial distribution network model

表 1 线路参数

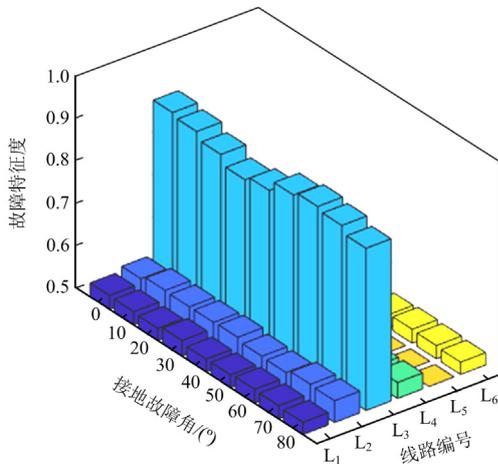
Table 1 Line parameters

线路类型	架空线路	电缆线路
$R_l/(\Omega/\text{km})$	0.17	0.193
$L_l/(\text{mH}/\text{km})$	1.21	0.442
$C_l/(\text{nF}/\text{km})$	9.697	143
$R_0/(\Omega/\text{km})$	0.23	1.93
$L_0/(\text{mH}/\text{km})$	5.48	1.477
$C_0/(\text{nF}/\text{km})$	6	143

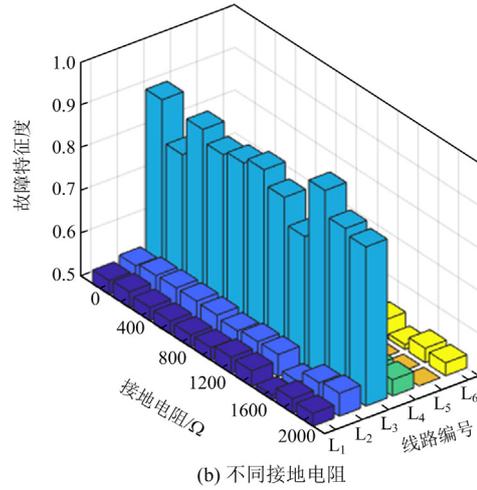
## 4.2 仿真分析

### 4.2.1 不含分布式电源的故障选线

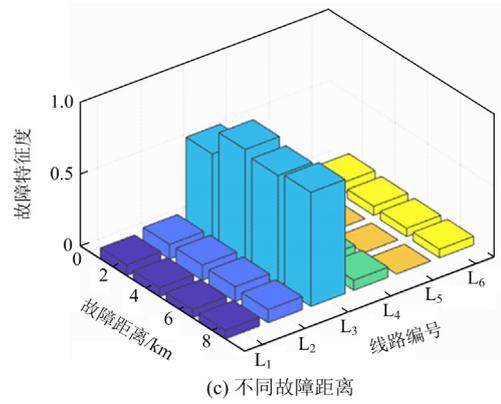
改变常见的故障条件, 如不同的故障馈线、初始相角  $\varphi$ 、接地电阻  $R_g$  和故障距离  $d$ , 所提方法的选线结果如图 7 所示。其中, 在不同故障角、接地电阻和故障距离的情况下, 故障线路  $L_3$  的故障度均最大。表 2 给出特定场景下选线结果。



(a) 不同故障角



(b) 不同接地电阻



(c) 不同故障距离

图 7 选线结果图

Fig. 7 Line selection result chart

表 2 无分布式电源选线结果

Table 2 Routing results without distributed generations

故障馈线, $\varphi/(\circ), R_g / \Omega, d/\text{km}$	多元暂态特征故障度矩阵	选线 结果
$L_2, 0, 1, 5$	[0.0300 0.9604 0.0446 0.0403 0.0002 0.0300]	$L_2$
$L_2, 0, 100, 5$	[0.1447 0.7631 0.0816 0.1618 0.0005 0.1447]	$L_2$
$L_2, 2000, 1, 5$	[0.1819 0.6407 0.0900 0.2019 0.0009 0.1819]	$L_2$
$L_3, 0, 1, 6$	[0.0659 0.0883 0.8178 0.0763 0.0001 0.0659]	$L_3$
$L_3, 0, 2000, 4$	[0.0744 0.1037 0.6222 0.0865 0.0001 0.0744]	$L_3$
$L_3, 60, 1, 6$	[0.0628 0.1072 0.8021 0.0758 0.0001 0.0628]	$L_3$
$L_3, 60, 2000, 6$	[0.0605 0.1072 0.7455 0.0760 0.0001 0.0605]	$L_3$
$L_3, 90, 1, 6$	[0.0581 0.1035 0.7681 0.0758 0.0001 0.0581]	$L_3$
$L_3, 90, 2000, 6$	[0.0600 0.0915 0.7982 0.0705 0.0001 0.0600]	$L_3$
$L_3, 0, 1, 4$	[0.0770 0.1026 0.7307 0.0877 0.0002 0.0770]	$L_3$
$L_3, 0, 2000, 4$	[0.0752 0.1038 0.6088 0.0894 0.0003 0.0752]	$L_3$
$L_3, 0, 1, 8$	[0.0232 0.0368 0.8867 0.0283 0.0001 0.0232]	$L_3$
$L_3, 0, 2000, 8$	[0.0674 0.0952 0.7702 0.0778 0.0001 0.0674]	$L_3$
$L_5, 45, 1, 4$	[0.0486 0.0808 0.0206 0.0625 0.9302 0.0486]	$L_5$
$L_5, 45, 100, 4$	[0.0561 0.0904 0.0389 0.0678 0.9486 0.0561]	$L_5$
$L_5, 45, 2000, 4$	[0.0539 0.0801 0.0433 0.0616 0.9317 0.0539]	$L_5$

由表 2 可知：电缆线路、架空线路、混合线路类型以及故障距离对选线方法影响较小，选线灵敏度基本不变；无论故障发生在相电压峰值还是过零点，均能正确选线，且故障线路特征较为明显。选线方法可以准确地检测出不同故障条件下的馈线故障，并且若任一故障指标不起作用，而其他两个指标都有效，结果仍然是正确的，因此多特征融合方法具有明显优势。

#### 4.2.2 含分布式电源的故障选线

在改变常见的故障条件的基础上，考虑了风机、光伏以及两者共同接入 3 种不同运行条件。为了进一步测试该方法的适用性，改变故障馈线、故障距离、接地电阻的检测结果分别如表 3—表 5 所示。结果表明，DG 并网时，该检测方法仍能准确地检测出故障馈线。

由表 3—表 5 所知，不同 DG 类型在考虑低电压穿越的并网时，故障条件对本文所提方法影响较小，均能完成选线目标。基于所有检测结果，可以准确地识别故障馈线，因此该故障检测方法不仅适用于传统的交流电源系统，也适用于 DG 并网的新能源配网系统。

表 3 风电场接入场景下故障选线结果

Table 3 Fault line selection results in wind farm connection scenarios

故障馈线, $\varphi/(^\circ), R_g/\Omega, d/\text{km}$	多元暂态特征故障度矩阵	选线 结果
L <sub>2</sub> ,45,200,5	[0.0848 0.7770 0.0487 0.1014 0.0001 0.0848]	L <sub>2</sub>
L <sub>2</sub> ,45,2000,5	[0.0903 0.7479 0.0554 0.1079 0.0001 0.0903]	L <sub>2</sub>
L <sub>3</sub> ,0,200,6	[0.0194 0.0837 0.8190 0.0213 0.0001 0.0194]	L <sub>3</sub>
L <sub>3</sub> ,0,2000,6	[0.0307 0.0593 0.8697 0.0400 0.0001 0.0307]	L <sub>3</sub>
L <sub>3</sub> ,90,200,6	[0.0803 0.0806 0.6804 0.0934 0.0002 0.0803]	L <sub>3</sub>
L <sub>3</sub> ,90,2000,6	[0.0809 0.0388 0.6668 0.0939 0.0002 0.0809]	L <sub>3</sub>
L <sub>5</sub> ,0,200,4	[0.0811 0.4510 0.0283 0.0946 0.7228 0.0811]	L <sub>5</sub>
L <sub>5</sub> ,0,2000,4	[0.0010 0.4225 0.0002 0.0011 0.6253 0.0010]	L <sub>5</sub>

表 4 光伏接入场景下故障选线结果

Table 4 Fault line selection results in PV access scenarios

故障馈线, $\varphi/(^\circ), R_g/\Omega, d/\text{km}$	多元暂态特征故障度矩阵	选线 结果
L <sub>2</sub> ,45,200,5	[0.0758 0.7205 0.0316 0.0866 0.0001 0.3305]	L <sub>2</sub>
L <sub>2</sub> ,45,2000,5	[0.0926 0.7106 0.0415 0.1074 0.0001 0.3397]	L <sub>2</sub>
L <sub>3</sub> ,0,200,6	[0.0812 0.1077 0.7486 0.0929 0.0001 0.4141]	L <sub>3</sub>
L <sub>3</sub> ,0,2000,6	[0.0864 0.1195 0.6605 0.1003 0.0001 0.4643]	L <sub>3</sub>
L <sub>3</sub> ,90,200,6	[0.0682 0.0910 0.7128 0.0767 0.0001 0.0717]	L <sub>3</sub>
L <sub>3</sub> ,90,2000,6	[0.0678 0.0909 0.6527 0.0776 0.0001 0.0676]	L <sub>3</sub>
L <sub>5</sub> ,0,200,4	[0.0143 0.0176 0.0038 0.0154 0.7965 0.3572]	L <sub>5</sub>
L <sub>5</sub> ,0,2000,4	[0.0710 0.1040 0.0337 0.0841 0.8623 0.3290]	L <sub>5</sub>

表 5 风电场、光伏共同接入场景下故障选线结果

Table 5 Fault line selection results in the scenario of common connection of wind farm and photovoltaic

故障馈线, $\varphi/(^\circ), R_g/\Omega, d/\text{km}$	多元暂态特征故障度矩阵	选线 结果
L <sub>2</sub> ,45,200,5	[0.0805 0.7310 0.0312 0.0867 0.0001 0.3899]	L <sub>2</sub>
L <sub>2</sub> ,45,2000,5	[0.0956 0.7187 0.0372 0.1012 0.0002 0.3891]	L <sub>2</sub>
L <sub>3</sub> ,0,200,6	[0.0344 0.1073 0.7114 0.0391 0.0001 0.1185]	L <sub>3</sub>
L <sub>3</sub> ,0,2000,6	[0.0469 0.1115 0.6707 0.0531 0.0001 0.1207]	L <sub>3</sub>
L <sub>3</sub> ,90,200,6	[0.0515 0.1433 0.7228 0.0576 0.0001 0.1455]	L <sub>3</sub>
L <sub>3</sub> ,90,2000,6	[0.0491 0.1580 0.6996 0.0550 0.0001 0.1572]	L <sub>3</sub>
L <sub>5</sub> ,0,200,4	[0.0391 0.1292 0.0120 0.0442 0.7518 0.0854]	L <sub>5</sub>
L <sub>5</sub> ,0,2000,4	[0.0556 0.1704 0.0135 0.0623 0.6237 0.1076]	L <sub>5</sub>

#### 4.2.3 电弧故障

间歇性重燃电弧因其电弧间歇性重燃的复杂性和随机性，导致断续电弧特征难以获取，进而使传统继电保护装置很难准确识别故障，从而出现零序电流保护拒动，不能快速切除故障，继而引发配电网在故障状态下运行，因此需考虑弧光接地场景。改进 Cassie-Mayr 模型能够完整反映电弧接地故障，电弧模型采用基于连续型过渡参数的 Cassie-Mayr 联合模型。

$$\frac{1}{g} = [1 - \xi(i_{\text{arc}})] \frac{1}{g_m} + \xi(i_{\text{arc}}) \frac{1}{g_c}, \xi(i_{\text{arc}}) \in [0, 1] \quad (20)$$

$$\frac{1}{g_m} \cdot \frac{dg_m}{dt} = \frac{1}{\tau_m} \left( \frac{i}{P_{\text{loss}} \cdot g_m} - 1 \right) \quad (21)$$

$$\frac{1}{g_c} \cdot \frac{dg_c}{dt} = \frac{1}{\tau_c} \left( \frac{e^2}{E_0^2} - 1 \right) \quad (22)$$

式中： $g_c$ 、 $g_m$  分别为 Cassie、Mayr 电弧模型电导； $\tau_m$ 、 $\tau_c$  分别为 cassie、Mayr 模型时间常数； $i_{\text{arc}}$  为电弧电流； $\xi(i_{\text{arc}})$  为连续型过渡参数， $\xi(i_{\text{arc}}) = \frac{1}{1 + e^{-\frac{i_{\text{arc}}}{I_0}}}$ ，其中  $I_0$  为电弧电流判断阈值； $P_{\text{loss}}$  为 Mayr

电弧模型向环境耗散能量的冷却功率； $E_0$  为 Cassie 模型弧柱间电压梯度，用来控制电弧电压幅值，具体参数如表 6 所示。

故障初期，电弧电流呈现振荡衰减的特征，电弧电流频繁过零导致电弧熄灭和重燃。故障中后期，电弧进入稳态，类似正弦函数，再加上一定的畸变，电弧电压的外观类似矩形波。由于电弧熄灭时电流为零的时间短，过零后时间电弧又会重新燃烧。

接下来，在图 6 所示的配电网中加入弧光接地模型，检测结果如表 7 所示。结果表明，该方法能够准确地检测出电弧故障。

表 6 Cassie-Mayr 电弧模型具体参数

Table 6 Specific parameters of Cassie-Mayr arc model

参数	连续函数
$\tau_m/s$	$1 \times 10^{-3}$
$\tau_c/s$	$1 \times 10^{-3}$
$P_{loss}/W$	1000
$E_0/V$	1000
电弧电流判断阈值 $I_0/A$	2
比例参数 $\beta$	500

表 7 电弧故障选线结果

Table 7 Arc fault line selection result

故障馈线, $\varphi/(^\circ), R_g/\Omega, d/km$	多元暂态特征故障度矩阵	选线 结果
$L_3, 0, 6$	[0.0038 0.0072 0.9678 0.0051 0.0001 0.0038]	$L_3$
$L_4, 90, 6$	[0.0353 0.0511 0.0426 0.9638 0.0001 0.0353]	$L_4$
$L_5, 0, 4$	[0.0100 0.0140 0.0023 0.0117 0.8057 0.0100]	$L_5$

### 4.3 适应性分析

从上文可以看出, 本文提出的方法能够有效选线。然而, 实际的配电网与图 6 所示的配电网也有一些明显的区别。首先, 真实的电力网络可能存在更多的馈线或分支。并且实际网络中可能存在不平衡负载或不平衡线路, 零序电流和零序电压在稳态下不再等于 0。不平衡负载或线路产生的非零暂态电流会影响故障指标的取值。最后, 随着可再生能源普及率的提高, 可能会有更多的 DG 接入到实际网络中。因此, 与径向配电网相比, 实际配电网可能具有更复杂的网络结构和随机暂态特征。因此, 针对 IEEE 34 总线测试系统进行适应性分析。

考虑分布式能源的影响, 对 IEEE 34 总线测试系统进行修改, 如图 8 所示,  $DG_1$  为风电场,  $DG_2$  为光伏电场, 并且对各分支节点进行编号, 如表 8 所示。

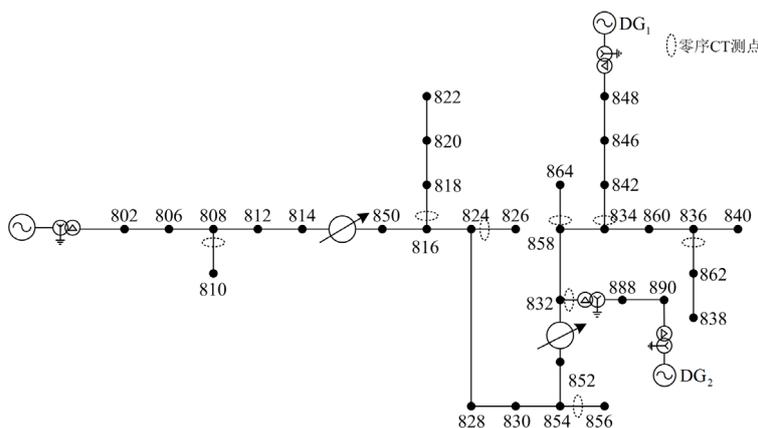


图 8 IEEE 34 节点配电网模型

Fig. 8 IEEE 34-bus distribution network model

表 8 节点分支编号

Table 8 Bus branch number

分支编号	节点编号	分支编号	节点编号
1	808,810	5	832,888,890
2	816,818,820,822	6	858,864
3	824,826	7	834 842,846,848
4	854,856	8	836,862,838

当分支 2、5、7 和 8 发生单相接地故障时, 通过所提方法进行选线。其中, 分支 2、7 是不对称的, 分支 5 和 8 是对称的, 且分支 5 和 7 有分布式能源接入。从表 9 中可以看出, 所有检测结果都是正确的。

### 4.4 现场验证

为了验证该方法的适应性, 在某 35 kV 变电站

表 9 IEEE 34 节点选线结果

Table 9 IEEE 34-bus line selection results

故障分支	$R_g / \Omega$	多元暂态特征故障度矩阵	选线结果
2	1	[0.0003 0.7993 0.0017 0.0029 0.0001 0.0001 0.2427 0.0015]	分支 2
	1000	[0.0001 0.6526 0.0657 0.0001 0.0001 0.0001 0.3089 0.1091]	分支 2
5	1	[0.0001 0.0102 0.0003 0.0001 0.7022 0.0001 0.4153 0.0003]	分支 5
	1000	[0.0001 0.0846 0.0763 0.0024 0.6384 0.0001 0.2059 0.0271]	分支 5
7	1	[0.0001 0.0158 0.0758 0.0002 0.4550 0.0001 0.5933 0.0017]	分支 7
	1000	[0.0001 0.0344 0.3673 0.0004 0.0001 0.0001 0.6176 0.1354]	分支 7
8	1	[0.0013 0.4627 0.0158 0.0131 0.0001 0.0001 0.0046 0.6137]	分支 8
	1000	[0.0016 0.2091 0.3260 0.0046 0.0001 0.0001 0.1163 0.5738]	分支 8

的一个 10 kV 配电网中进行了现场试验。该配网共有 6 条 10 kV 出线，共部署 13 套 EG-1002(配电网广域分布式监测及故障录波定位装置)，当接地故障发生时，各 EG-1002 根据零序电压突变时刻自动锁存电流初始暂态波形。现场试验网络结构如图 9 所示。

如图 10 所示，914 线、916 线、913 线、915 线、911 线和 912 线合成零序电流的最大峰值分别为 18 A、3 A、5 A、2 A、4.8 A、1 A。根据所提选线方法，故障特征度矩阵为 $[0.6580 \ 0.0115 \ 0.0195 \ 0.0131 \ 0.0140 \ 0.0093]$ ，现场试验结果验证了该方法的有效性和准确性。

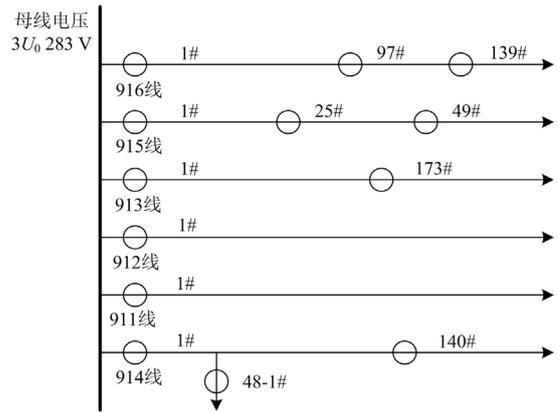


图 9 现场试验网络结构图

Fig. 9 Diagram of the field test network

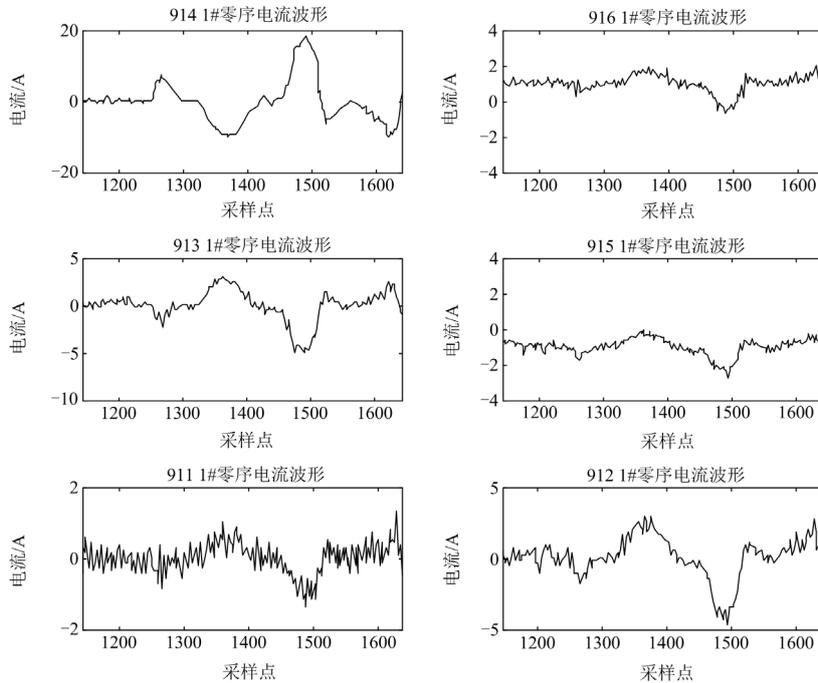


图 10 各条出线合成零序电流波形

Fig. 10 Synthetic zero-sequence current waveform of each outgoing line

### 5 算法对比

为了进一步验证所提方法的优越性，将现有方法与所提方法进行对比。方法 1 根据波形差，选择归一化互相关距离作为检测准则<sup>[22]</sup>；方法 2 采用全系积分经验模态分解和希尔伯特变换对瞬态零序电流进行分解，采用瞬时幅值构造故障检测判据<sup>[23]</sup>；方法 3 通过分析暂态零序电流中的能量特性，计算暂态能量来确定故障馈线<sup>[24]</sup>。以图 6 所示的径向配电网模型为例，考虑不同故障场景下，所得选线结果如表 10 所示。

在表 10 中，方法 1、方法 2、方法 3 采用单故障指标，可能会造成选线失败。如当馈线 3 发生电弧故障时，方法 2、方法 3 中的检测准则不适用。在本文检测准则中，通过求取多元故障特征度，可以捕获更多的故障特征，提高了检测精度，验证了所提检测方法的优越性和可行性。

### 6 结论

基于基频移频法和 Copula 理论，提出了一种新的馈线故障检测方法，主要结论如下：

- 1) 故障馈线和健全馈线的零序暂态电流都存

在基频分量, 在 Hilbert 变换的基础上, 引入位移因子去除基频分量, 避免了第一故障瞬间对零序暂态电流实际幅值和极性的影响;

2) 由于峭度、暂态能量相对熵和相似度是故障馈线与健全馈线的典型差异特征, 通过融合这些特征, 可以基于 Copula 理论有效地估计综合故障程度;

3) 采用含分布式电源的 IEEE 34 节点模型, 结合光伏和风机对该方法进行了测试, 结果表明该方法具有良好的性能。

表 10 采用不同检测方法对比结果

Table 10 Comparison results of adopting different detection methods

选线方法	故障馈线	$R_g/\Omega$	故障可能性矩阵	选线结果
1	$L_3$	1	[0.1619 0.1962 0.2957 0.1782 0.0058 0.1619]	$L_3$
	$L_3$	2000	[0.1397 0.2687 0.1930 0.1536 0.1050 0.1397]	$L_2$
	$L_3$	电弧故障	[0.0682 0.0854 0.6999 0.0758 0.0023 0.0682]	$L_3$
2	$L_3$	1	[0.0647 0.0885 0.5027 0.0698 0.2094 0.0647]	$L_3$
	$L_3$	2000	[0.0653 0.0898 0.4953 0.0698 0.2143 0.0653]	$L_3$
	$L_3$	电弧故障	[0.0895 0.1136 0.2181 0.0961 0.3929 0.0895]	$L_5$
3	$L_3$	1	[0.0480 0.0728 0.7722 0.0587 0.0001 0.0480]	$L_3$
	$L_3$	2000	[0.0843 0.1445 0.5800 0.1066 0.0001 0.0843]	$L_3$
	$L_3$	电弧故障	[0.1678 0.2548 0.2041 0.2051 0.0002 0.1678]	$L_2$
本文	$L_3$	1	[0.0659 0.0883 0.8178 0.0763 0.0001 0.0659]	$L_3$
	$L_3$	2000	[0.0744 0.1037 0.6222 0.0865 0.0001 0.0744]	$L_3$
	$L_3$	电弧故障	[0.0038 0.0072 0.9678 0.0051 0.0001 0.0038]	$L_3$

## 参考文献

- [1] BARIK M A, GARGOOM A, MAHMUD M A, et al. A decentralized fault detection technique for detecting single phase to ground faults in power distribution systems with resonant grounding[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(5): 2462-2473.
- [2] WANG Xiaowei, GAO Jie, WEI Xiangxiang, et al. High impedance fault detection method based on variational mode decomposition and Teager-Kaiser energy operators for distribution network[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(6): 6041-6054.
- [3] 李高明, 黎皓彬, 卢颖, 等. 基于暂稳态电流幅值比较的谐振接地系统故障选线方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(10): 97-103.
- LI Gaoming, LAI Haobin, LU Ying, et al. Fault line selection method for resonance grounding system based on comparison between transient and steady-state current amplitudes[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(10): 97-103.
- [4] 韦莉珊, 贾文超, 焦彦军. 基于 5 次谐波与导纳不对称度的配电网单相接地选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(15): 77-83.
- WEI Lishan, JIA Wenchao, JIAO Yanjun. Single-phase fault line selection scheme of a distribution system based on fifth harmonic and admittance asymmetry[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(15): 77-83.
- [5] 韦明杰, 石访, 张恒旭, 等. 基于同步零序电流谐波群体比相的谐振接地系统高阻故障选线及区段定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(24): 8358-8372.
- WEI Mingjie, SHI Fang, ZHANG Hengxu, et al. Feeder selection and section location of high impedance fault at resonant networks based on the phase differences between the synchronous harmonics of the zero sequence currents[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(24): 8358-8372.
- [6] 周宇, 汤涛, 曾祥君, 等. 基于零序电流幅值比倍增系数的灵活接地系统故障选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(23): 112-120.
- ZHOU Yu, TANG Tao, ZENG Xiangjun, et al. Fault line detection method for a flexible grounding system based on a zero-sequence current amplitude ratio multiplication coefficient[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(23): 112-120.
- [7] 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. Faulty line selection based on transient wavelet energy for non-solid-earthed network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(5): 70-75.
- [8] 邵文权, 程畅, 卫晓辉, 等. 利用暂态电流 Hausdorff 距离的谐振配电网故障选线方案[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(8): 33-42.
- SHAO Wenquan, CHENG Chang, WEI Xiaohui, et al. Fault line selection scheme using the Hausdorff distance of transient current in resonant distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(8): 33-42.
- [9] 张玉玺, 王增平, 李振钊, 等. 基于特征频带暂态无功功率的配电网故障选线新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(1): 1-11.

- ZHANG Yuxi, WANG Zengping, LI Zhenzhao, et al. A new method of fault line selection in a distribution network based on characteristic frequency band transient reactive power[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(1): 1-11.
- [10] 李振兴, 王新, 王鹏飞, 等. 综合工频与特征频率零序导纳角差的选线方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(12): 13-21.
- LI Zhenxing, WANG Xin, WANG Pengfei, et al. Line selection method based on the zero-sequence admittance angle difference of power frequency and characteristic frequency[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(12): 13-21.
- [11] 王远川, 李泽文, 夏翊翔, 等. 基于 VMD 和改进聚类算法的配电网故障选线方法[J/OL]. *电力系统及其自动化学报*: 1-9[2023-09-30]. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.001214>.
- WANG Yuanchuan, LI Zewen, XIA Yixiang, et al. Fault line selection method of distribution network based on VMD and improved clustering algorithm[J/OL]. *Proceedings of the CSU-EPSA*: 1-9[2023-09-30]. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.001214>.
- [12] 魏科文, 张靖, 何宇, 等. 基于 VMD 和相关性聚类的谐振接地系统单相接地故障选线[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(22): 105-113.
- WEI Kewen, ZHANG Jing, HE Yu, et al. Single-phase grounding fault line selection in a resonant grounding system based on VMD and correlation clustering[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(22): 105-113.
- [13] JAMALI S, RANJBAR S, BAHMANYAR A. Identification of faulted line section in microgrids using data mining method based on feature discretisation[J]. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2020, 30(6).
- [14] 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.
- [15] CHENG X R, CUI B J, HOU S Z. Fault line selection of distribution network based on modified CEEMDAN and GoogLeNet neural network[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(13): 13346-13364.
- [16] AFRASIABI S, AFRASIABI M, JARRAHI M A. Fault location and faulty line selection in transmission networks: application of improved gated recurrent unit[J]. *IEEE Systems Journal*, 2022, 16(3): 5056-5066.
- [17] LIANG Jiefeng, JING Tianjun, NIU Huanna, et al. Two-terminal fault location method of distribution network based on adaptive convolution neural network[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 54035-54043.
- [18] WU Xiaomin, WANG Dianhong, CAO Weihua, et al. A genetic-algorithm support vector machine and D-S evidence theory based fault diagnostic model for transmission line[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(6): 4186-4194.
- [19] WANG Xiaowei, WEI Xiangxiang, YANG Dechang, et al. An adaptive fault detection method based on atom sparse and evidence fusion for the small current to ground system[J]. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2017.
- [20] WANG Ruixiao, LIU Zhiyu, WANG Xinming. The Research on multi-criteria fusion strategy of non-effectively grounded system single-phase-to-ground fault based on the fuzzy theory[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 462: 209-216.
- [21] 喻锬, 胥鹏博, 曾祥君, 等. 基于模糊测度融合诊断的配电网接地故障选线[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(3): 623-633.
- YU Kun, XU Pengbo, ZENG Xiangjun, et al. Grounding fault line selection of distribution networks based on fuzzy measures integrated diagnosis[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(3): 623-633.
- [22] WANG Xiaowei, WEI Xiangxian. Fault feeder detection method utilized steady state and transient components based on FFT backstepping in distribution networks[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2020, 114: 105391.
- [23] DONG X Z, SHI S X. Identifying single-phase-to-ground fault feeder in neutral noneffectively grounded distribution system using wavelet transform[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2008, 23(4): 1829-1837.
- [24] WANG Xuewen, ZHANG Hengxu, SHI Fang. Location of single phase to ground faults in distribution networks based on synchronous transients energy analysis[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(1): 774-785.

收稿日期: 2024-01-15; 修回日期: 2024-03-27

作者简介:

邓祥力(1973—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统稳定与控制; E-mail: xiangli\_deng@163.com

赵磊鑫(1998—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制。E-mail: zlx\_527@yeah.net

(编辑 姜新丽)