

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108663

# 基于参数优化 VMD 和能量相似度的 配电网故障区段定位方法\*

杜政奇<sup>1</sup> 王敬华<sup>2</sup> 张新慧<sup>1</sup>

(1. 山东理工大学电气与电子工程学院 淄博 255049; 2. 山东科汇电力自动化股份有限公司 淄博 255087)

**摘要:** 针对配电网发生单相接地故障时故障特征微弱且易受外界噪声干扰的问题,提出了一种基于参数优化变分模态分解(VMD)与能量相对熵相结合的故障区段定位方法。首先通过鲸鱼优化算法优化后的 VMD 分解故障零序电流得到若干个反映局部信号特征的本征模态分量(IMF),进而求取各 IMF 分量的 Hilbert 边际谱,选取能量最大的分量作为故障零序电流的暂态主频分量,利用能量相对熵衡量相邻检测点暂态主频分量的能量差异,计算比较,确定熵值最大的区段即为故障区段。仿真结果表明,本方法不受故障位置、故障初相角等不同故障条件的影响,且在有噪声干扰时仍可实现高正确率故障区段定位。

**关键词:** 参数优化;VMD;零序电流;能量相似度;故障区段定位

中图分类号: TM72 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 470.4054

## Fault section location in distribution network based on parameter optimization VMD and energy similarity

Du Zhengqi<sup>1</sup> Wang Jinghua<sup>2</sup> Zhang Xinhui<sup>1</sup>

(1. Electrical and Electronic Engineering College, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China;

2. Shandong Kehui Power Automation Co., Ltd., Zibo 255087, China)

**Abstract:** Aiming at the weak fault characteristics and susceptibility to external noise when a single-phase ground occurs in the distribution network, a fault section location method based on the combination of parameter optimization optimization variational mode decomposition(VMD) and energy relative entropy is proposed. Firstly, the fault zero-sequence current is decomposed by the VMD optimized by the whale optimization algorithm, and several intrinsic mode functions(IMF) reflecting the local signal characteristics are obtained. Then, the Hilbert marginal spectrum of each IMF is obtained, the transient main frequency component of the fault zero sequence current is selected as the largest energy component, the energy difference between the adjacent detection points is represented by energy relative entropy. Through calculation and comparison, the section of maximum entropy is fault section. The simulation results show that the method is not affected by different fault conditions such as fault location, fault initial phase angle, etc, and in the presence of noise interference, high accuracy fault section location can still be achieved.

**Keywords:** parameter optimization;VMD;zero sequence current;energy similarity;fault section location

## 0 引言

谐振接地系统发生单相接地故障时,由于消弧线圈的补偿作用,使得故障电流稳态分量更加微弱,加之故障暂态持续时间较短,对故障特征的提取更加困难。另外,在某些极限的故障条件下,故障区段定位的准确性进一步受到考验<sup>[1]</sup>。

现阶段,故障区段定位技术主要是在选线技术的基础上发展而来的。信号注入法主要是向电网中注入特定频率的信号,根据信号的流向来判断故障位置,但需要额外增加信号注入和检测设备,成本较大且定位效果较差。另一类方法主要利用沿线装设的现场设备馈线终端单元(feeder terminal unit, FTU)采集的故障实时信息实现故障区段定位。残流增量法<sup>[2]</sup>、零序电流相位法、阻抗矩阵法<sup>[3-4]</sup>、谐波

收稿日期:2021-12-22

\* 基金项目:淄博市张店区校城融合项目(2021JSCG0006)资助

法等基于稳态量的定位方法在谐振接地系统中其故障特征容易受故障条件,环境噪声影响,故障特征提取困难,实际应用中效果并不理想。基于故障电流暂态量的行波定位方法<sup>[5]</sup>由于配电网网络结构复杂,其行波波头和反射行波识别困难。方涛等人利用 Prony 来拟合零序电流提取主频分量,但是, Prony 容易受噪声的影响且数据预处理时滤波的截止频率不易确定<sup>[6]</sup>;胡安平等<sup>[7-8]</sup>通过小波变换分解暂态零序电流获得小波包能量熵,存在小波基函数选取困难的问题;陈剑等人运用变分模态分解 (variational mode decomposition, VMD) 对信号进行分解,在预先设置参数  $K$  和  $\alpha$  容易受人为主观因素的影响<sup>[9]</sup>;张林利等人根据暂态零模电流振荡频率实现故障区段定位,但在极限故障条件下,由于电感电流的衰减时间较长,暂态频率计算结果与实际结果有所偏差<sup>[10]</sup>;徐艳春等<sup>[11]</sup>对各区段暂态零序电流进行局部均值分解 (local mean decomposition, LMD), 然后计算分解后所有乘积函数 (product function, PF) 的能量相对熵实现故障区段定位。但是, LMD 分解存在端点效应,需对暂态零序电流信号进行预处理以消除端点效应现象。

基于上述文献所提方法存在的局限性,本文提出了一种基于参数优化 VMD 和能量相对熵相结合的配电网故障区段定位方法。首先利用鲸鱼优化算法 (whale optimization algorithm, WOA) 对 VMD 的分解层数  $K$  和惩罚因子  $\alpha$  进行自适应寻优得到最优分量组合,然后在最优解下分解各 FTU 采集到的故障零序电流得到若干本征模态函数 (intrinsic mode function, IMF), 其次求取各 IMF 分量的 Hilbert 边际谱,定义 Hilbert 边际谱能量最大对应的 IMF 分量作为暂态主频分量,计算各区段暂态主频分量的能量相对熵。通过比较各区段熵值的大小,结合本文相应的故障判据实现配电网故障区段的准确定位。最后,通过大量仿真验证,本文所提方法在噪声干扰和不同的故障条件下均可准确判断出故障区段。

### 1 小电流接地系统暂态等值电路分析

适用于故障选线<sup>[12]</sup>的暂态等值电路无法准确分析故障点上下游暂态特征的差异,在此基础上,建立了适用于故障区段定位的暂态等值电路如图 1 所示。图 1 中  $C_{0(n-1)}$  和  $i_{0(n-1)}$  ( $n=1\sim m-1$ ) 分别为健全线路对地电容以及对应的电容电流;  $C_{0m}$  和  $i_{0m}$  为故障线路故障点上游线路对地电容和电容电流;  $L_p$  为消弧线圈的电感值。

在分析发生单相接地故障的暂态过程时,采用卡伦鲍尔 (Karrenbauer) 变换对三相系统解耦,变换为无耦合的线模分量 (1、2 模) 和零模分量 (0 模)。根据发生故障时的边界条件,考虑消弧线圈建立了如图 2 所示的故障点上下游模网络等效模型。

其中,  $u_t$  为故障点虚拟电压源;  $R_l$ 、 $L_l$  分别为健全线路和故障点到母线间线路的 2 倍线模电阻、零模电阻之和和

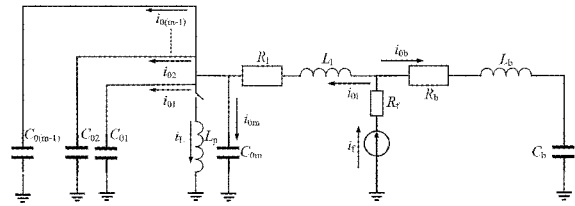


图 1 小电流接地暂态等值电路

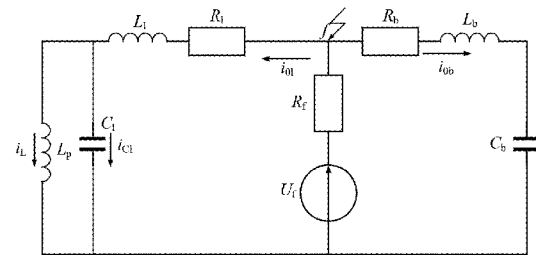


图 2 故障点上下游模网络等效模型

2 倍线模电感与零模电感之和;  $R_l$  为故障点过渡电阻;  $C_l$  和  $C_b$  分别为故障点上游和下游线路对地电容;  $i_{0l}$  和  $i_{0b}$  分别为流经故障点上游和下游的暂态零序电流。

发生单相接地故障时,故障点上下游为独立的暂态过程,以暂态零序电流  $i_{0l}$ ,  $i_{0b}$  为变量建立回路微分方程,求解得到故障点上下游暂态零序电流表达式:

$$i_{0x,t} = I_{cm} e^{-\delta_x t} [(\omega_{0x}/\omega \sin\varphi \sin\omega_{0x} t - \cos\varphi \cos\omega_{0x} t) + \cos(\omega t + \varphi)] \quad (1)$$

式中:  $I_{cm}$  为单相接地故障点流过的故障电流的幅值,  $I_{cm} = U_m \omega C_x$ ;  $x = l$  或  $b$ ,  $l$  和  $b$  分别代表故障点上游和下游;  $\varphi$  为故障初相角;  $\delta_x$  为暂态电容电流的衰减系数,  $\delta_x = R_x/2L_x$ ;  $\omega_{0x} = \sqrt{1/L_x C_x - (R_x/2L_x)^2}$  为故障零序电流暂态主频分量的自由振荡频率。

由图 2 中可以看出,故障点上游还存在由消弧线圈电感引起的暂态电感电流  $i_L$ , 根据非线性理论求解可得暂态电感电流表达式如下:

$$i_L = I_{Lm} [\cos\varphi e^{-\delta_L t} - \cos(\omega t + \varphi)] \quad (2)$$

其中,  $I_{Lm}$  为暂态电感电流的幅值,  $I_{Lm} = U_m/\omega L_p$ ;  $\delta_L$  为暂态电感电流的衰减系数,  $\delta_L = R_l/2L_p$ 。由式 (2) 可得,暂态电感电流表达式中包含了衰减直流分量和稳态工频分量,由于其稳态工频分量仅削弱了暂态电容电流中的稳态分量,故对单相接地故障暂态过程影响较小。其衰减直流分量的大小随着故障初相角  $\varphi$  的增加而递减,在极限条件故障初相角  $\varphi = 0^\circ$  时,衰减直流分量的幅值明显大于其余分量,在后续零序电流经 VMD 分解后,需滤除衰减直流分量和经消弧线圈补偿后的稳态工频分量,再选取能量最大对应的暂态主频分量。

对于实际配电网电力线路,一般有:  $1/L_x C_x \gg (R_x/2L_x)^2$ <sup>[13]</sup>, 且故障点上游不仅包含故障点到母线的线

路长度,还包含了大量的健全线路,而故障点下游仅包含故障点到负荷侧的线路长度。根据 $\omega_{0s}$ 简化表达式可知,故障点上下游零序电流暂态主频分量的频率存在很大差异。另外,故障点上游相邻检测点故障零序电流之差仅为该区段的对地电容电流,两侧暂态主频分量幅值相近,波形相似<sup>[14]</sup>。而故障点两侧零序电流暂态主频分量幅值差异明显,波形差异较大。

## 2 参数优化VMD

VMD是一种新的时频分析方法,能够将多分量信号一次性分解成多个单分量调幅、调频信号,有效避免了经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)<sup>[15]</sup>带来的模态混叠和端点效应问题。VMD变分问题的构造和求解<sup>[16]</sup>过程本文不再叙述。

VMD不同于经验模态分解(EMD),在对数据信号分解之前,需要提前设置分解层数 $K$ 和惩罚因子 $\alpha$ ,翟二杰等<sup>[17]</sup>根据求解的暂态零序电流表达式预先设置分解层数 $K=3$ ,并不能准确地提取零序电流的主频分量。刘建昌等<sup>[18]</sup>分析了参数 $K$ 和 $\alpha$ 对分解效果的影响,分解层数 $K$ 设置较大会出现虚假分量,而惩罚因子设置较小,在中心频率的迭代过程中会出现频率相互交叉现象。因此,参数 $K$ 和 $\alpha$ 的选取是VMD的关键所在。

罗亦冰等<sup>[19]</sup>利用样本熵、中心频率比以及相关系数来对VMD的参数 $K$ 进行寻优。但是,这种方法无法表明两个影响参数 $[K, \alpha]$ 间的交叉相互作用对分解效果的影响。

针对上述问题所在,本文利用WOA对VMD的参数 $K$ 和 $\alpha$ 进行迭代寻优。为了避免出现欠分解的现象,将惩罚因子和分解层数寻优的范围限制在 $[0.5f_s, 2.5f_s]$ 和 $[3, 8]$ 。引入包络熵<sup>[20]</sup>作为迭代寻优过程中的适应度函数。包络熵 $E_p$ 计算如下所示:

$$E_p = - \sum_{i=1}^N e_i \lg e_i \quad (3)$$

$$e_i = a(i) / \sum_{i=1}^N a(i) \quad (4)$$

式中: $e_i$ 为 $a(i)$ 的归一化形式, $N$ 为信号的数据长度, $a(i)$ 为零均值信号 $x(i)$ 经Hilbert变换解调后的包络信号, $N$ 为信号的数据长度。

当谐振接地系统发生单相接地故障时,故障初相角 $\varphi=90^\circ$ ,暂态高频电容电流可以达到稳态工频电流幅值的几十倍,信号波形在短时间会出现明显的周期性冲击脉冲,信号呈现较强的稀疏特性,包络熵值较小。相反,若故障信号存在大量的噪声信号,则信号的稀疏特性较差,包络熵值较大。选择 $K$ 个分量中最小的包络熵作为局部极小熵,与该最小熵值对应的分量蕴含着丰富的故障特征信息。因此,将局部极小熵值作为整个搜索过程的适应度函数,寻找全局搜索过程中的最佳分量组合 $[K, \alpha]$ ,达到全局最优参数的目的。

## 3 零序电流分解效果测试

以第5节的仿真模型为例,取故障点距离母线5 km,故障初相角 $\varphi=90^\circ$ ,过渡电阻 $R_f=200 \Omega$ ,利用优化后的VMD对故障点上游的零序电流信号进行分解,全局局部极小熵迭代曲线如图3所示。

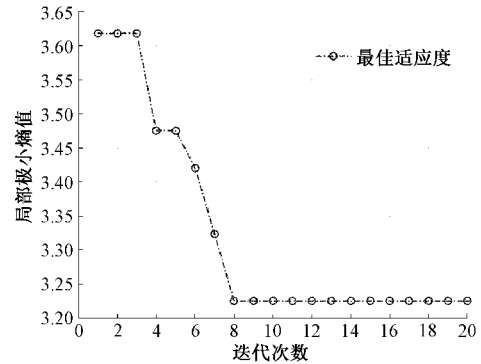


图3 局部极小熵迭代进化曲线

由图3可以看出,在迭代8次后,局部极小熵值达到最优值3.2252,最优分量组合为 $[K, \alpha]=[6, 36.230]$ 。

运用优化后的VMD对FTU采集到的零序电流进行分解,考虑到发生单相接地故障时其暂态时间很短,取故障发生后一个工频周期的数据进行分解,分解结果如图4所示。

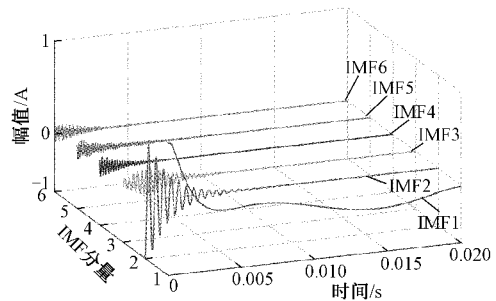


图4 VMD分解暂态零序电流效果图

考虑到傅里叶变换在处理非平稳信号的限制性,在此引入Hilbert边际谱来表征各IMF分量的能量在频率轴上的分布情况,如图5所示。IMF1分量的瞬时频率在50 Hz左右,结合式(1)和(2)可知,故障电流低频分量中不仅包括稳态工频分量还应包括暂态电感电流中的衰减直流分量,由于VMD中DC参数的限制,其衰减直流分量并不能理想且直观的分解出来。但对故障暂态零序电流高频分量的提取影响较小。IMF2的瞬时频率在1700 Hz左右,且能量远大于其余频率下的能量,可近似代表暂态过程的基本特征,即定义IMF2分量为故障零序电流的暂态主频分量。

## 4 故障区段定位判据

能量相对熵能表征两信号能谱值概率分布的差异情

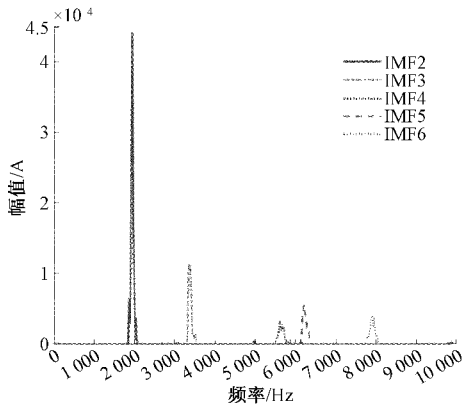


图 5 IMF 分量 Hilbert 边际谱对比图

况,相对熵值越大,两信号之间差异越明显;反之,熵值越小,两信号之间差异就越小。

暂态主频分量能量相对熵具体计算步骤如下:

1)首先以故障线路上各 FTU 零序电流主频分量的能量之和( $E$ )作为整体系统:

$$E = \sum_{k=1}^m (I_k)^2 \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

2)将采集的数据划分为等间隔的数据长度,即  $t = n\Delta t (n = 1, 2, \dots, N)$ , 将  $t$  时刻对应的能量归一化处理,计算式如下:

$$e_{k,t} = \frac{(I_{k,t})^2}{E} \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

3)根据熵的理论,定义基于暂态零序电流主频分量的能量相对熵,第  $k$  个 FTU 与第  $k+1$  个 FTU 主频分量能量相对熵为:

$$\rho_{k,k+1} = \sum_{n=1}^N \left| e_{k,t} \ln \frac{e_{k,t}}{e_{k+1,t}} \right| \quad k = 1, 2, \dots, m-1 \quad (7)$$

$$\rho_{k-1,k} = \sum_{n=1}^N \left| e_{k+1,t} \ln \frac{e_{k+1,t}}{e_{k,t}} \right| \quad k = 1, 2, \dots, m-1 \quad (8)$$

$$\rho_{k,k+1} = \rho_{k,k+1} + \rho_{k-1,k} \quad (9)$$

式中:  $t = n\Delta t (n = 1, 2, \dots, N)$ ,  $\Delta t = 1/[(t_1 - t_0) * f_s]$ ,  $t_1$  和  $t_0$  分别为仿真结束和开始时间,  $f_s$  为采样频率。考虑到线路末端发生单相接地故障时故障点下游故障零序电流暂态主频分量的振荡频率较大,本文取  $f_s = 20$  kHz。

### 5 仿真实验

为了验证所提定位方法在不同故障条件下的适应性,在 ATP/EMTP 中搭建了基于分布参数的 10 kV 谐振接地系统仿真模型,如图 6 所示,  $S_i (i = 1, \dots, 5)$  为故障线路上各 FTU 序号,相邻 FTU 线路长度 3 km。在线路 L1 距离故障点 5 km、8 km、10 km 处发生单相接地故障,设置消弧

线圈为过补偿状态,脱谐度  $v$  为 8%,计算可得  $L_p = 9.6$  H,线路参数如表 1 所示。

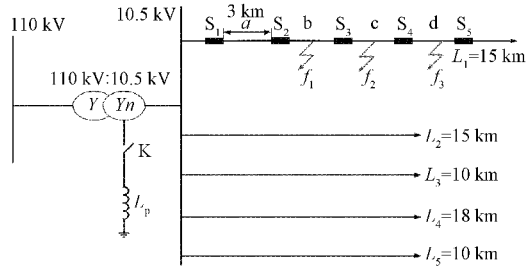


图 6 10 kV 谐振接地系统仿真模型

表 1 线路分布参数

相序	R( $\Omega$ /km)	L(mH/km)	C( $\mu$ F/km)
正序	0.26	0.12	0.009 8
零序	0.52	4.7	0.004 7

### 5.1 仿真实验结果

针对不同故障位置、不同过渡电阻、不同故障初相角等各种条件下做了一系列仿真实验,受篇幅限制,在此只具体分析具有代表性故障条件下的仿真实验结果。

情况一:取故障线路距离母线 5 km 发生单相接地故障,故障初相角  $\varphi = 90^\circ$ , 过渡电阻  $R_f = 10 \Omega$ , 故障点上游零序电流经过 WOA 8 次迭代,得到全局最优局部极小包络熵值 2.397 3,此时所对应的最优解为  $[K, \alpha] = [3, 10 795]$ ,而故障点下游零序电流经过 WOA 8 次迭代,得到全局最优局部极小值包络熵值为 2.597 5,此时所对应的最优解为  $[K, \alpha] = [6, 49 870]$ 。选取能量最大的分量为对应的暂态主频分量,各检测点零序电流暂态主频分量 Hilbert 边际谱如图 7 所示。

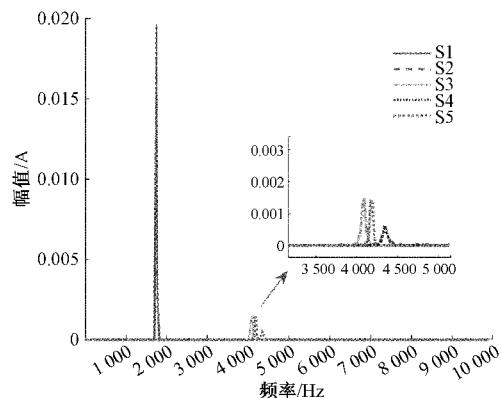


图 7 暂态主频分量 Hilbert 边际谱对比图

计算相邻检测点主频分量能量相对熵,熵值如表 2 所示。

表 2 故障区段定位结果

故障条件	故障特征	$S_1 - S_2$ (a)	$S_2 - S_3$ (b)	$S_3 - S_4$ (c)	$S_4 - S_5$ (d)	定位结果
$R_f = 10 \Omega$	主频	[1 804 1 800]	[1 800 4 200]	[4 200 4 204]	[4 204 4 210]	✓
$\varphi = 90^\circ$	相对熵值	15.81	510.29	207.46	101.07	

情况二:取故障线路距离母线8 km处发生单相接地故障,故障初相角 $\varphi = 45^\circ$ ,过渡电阻 $R_f = 50 \Omega$ ,故障点上游零序电流经过WOA优化10次迭代,得到全局最优局部极小包络熵值2.3154,此时得到的最优解 $[K, \alpha] = [8, 47.571]$ ,而故障点下游零序电流经过WOA优化8次迭代,得到全局最优局部极小包络熵值2.7992,此时得到的最优解 $[K, \alpha] = [8, 40.579]$ 。选取能量最大的分量为对应的暂态主频分量,各检测点零序电流暂态主频分量Hilbert边际谱如图8所示。

计算相邻检测点主频分量能量相对熵,熵值如表3所示。

结合表2和3计算结果可知,针对不同故障位置、故障

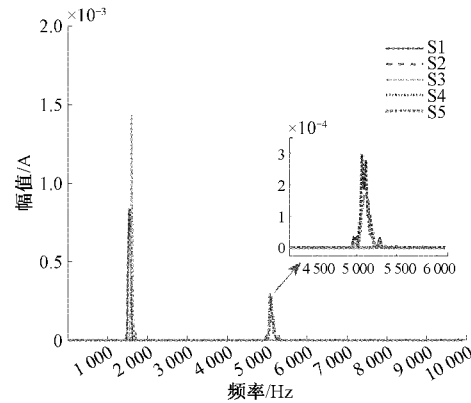


图8 暂态主频分量Hilbert边际谱对比图

表3 故障区段定位结果

故障条件	故障特征	$S_1 - S_2$ (a)	$S_2 - S_3$ (b)	$S_3 - S_4$ (c)	$S_4 - S_5$ (d)	定位结果
$R_f = 50 \Omega$	主频	[1 501 1 500]	[1 500 1 510]	[1 510 5 100]	[5 100 5 100]	✓
$\varphi = 45^\circ$	相对熵值	58.65	65.14	393.86	155.26	

时间和过渡电阻等仿真可见,故障点上游和下游零序电流暂态主频分量的振荡频率呈现各异的现象。故障上游区段由于线路长度远大于故障下游区段,主频相对较低;而故障下游线路较短,主频相对较高。且故障区段的熵值明显大于健全区段的熵值,可实现故障区段的准确定位。

### 5.2 算法实际应用分析

为了模拟实际应用中配电网受噪声影响的环境,对故障线路上各FTU采集到的零序电流添加信噪比为20 dB的高斯白噪声。故障线路各检测点零序电流暂态主频分量的振荡频率和相邻检测点的熵值如表4所示。

表4 故障区段定位结果

$f / R_f / \varphi$	故障特征	$S_1 - S_2$ (a)	$S_2 - S_3$ (b)	$S_3 - S_4$ (c)	$S_4 - S_5$ (d)	定位结果
$f_1 / 10 \Omega / 0^\circ$	主频	[1 710 1 710]	[1 710 4 196]	[4 196 4 200]	[4 200 4 212]	✓
	相对熵值	496.83	831.29	18.70	13.10	
$f_1 / 20 \Omega / 30^\circ$	主频	[1 836 1 838]	[1 838 4 218]	[4 218 4 256]	[4 256 4 256]	✓
	相对熵值	317.14	1 048.19	885.87	91.91	
$f_1 / 50 \Omega / 45^\circ$	主频	[1 938 1 912]	[1 912 4 278]	[4 278 4 290]	[4 290 4 266]	✓
	相对熵值	474.87	638.93	327.63	161.37	
$f_1 / 100 \Omega / 90^\circ$	主频	[1 870 1 866]	[1 866 4 752]	[4 752 4 756]	[4 756 4 756]	✓
	相对熵值	221.23	756.21	88.93	154.01	
$f_2 / 10 \Omega / 0^\circ$	主频	[1 350 1 348]	[1 348 1 346]	[1 346 5 448]	[1 346 5 448]	✓
	相对熵值	314.81	295.77	650.92	10.68	
$f_2 / 20 \Omega / 30^\circ$	主频	[1 418 1 418]	[1 418 1 416]	[1 416 5 478]	[5 478 5 478]	✓
	相对熵值	220.53	296.80	445.47	55.42	
$f_2 / 50 \Omega / 45^\circ$	主频	[1 532 1 534]	[1 534 1 528]	[1 528 6 334]	[6 334 6 340]	✓
	相对熵值	164.42	176.25	612.85	111.09	
$f_2 / 100 \Omega / 90^\circ$	主频	[1 562 1 522]	[1 522 1 518]	[1 518 8 140]	[8 104 8 100]	✓
	相对熵值	109.84	58.40	1 064.99	196.29	
$f_3 / 10 \Omega / 0^\circ$	主频	[1 180 1 184]	[1 184 1 182]	[1 182 1 186]	[1 186 7 648]	✓
	相对熵值	323.67	292.25	200.72	698.47	
$f_3 / 20 \Omega / 30^\circ$	主频	[1 242 1 240]	[1 240 1 272]	[1 272 1 268]	[1 268 7 650]	✓
	相对熵值	60.67	297.01	104.23	789.89	
$f_3 / 50 \Omega / 45^\circ$	主频	[1 344 1 346]	[1 346 1 342]	[1 342 1 340]	[1 340 7 632]	✓
	相对熵值	255.28	246.27	116.44	525.48	
$f_3 / 100 \Omega / 90^\circ$	主频	[1 356 1 350]	[1 350 1 348]	[1 348 1 348]	[1 348 9 032]	✓
	相对熵值	171.31	160.97	200.02	483.50	

从表 4 分析可知,虽然在过渡电阻较大的情况下且由于故障点下游线路较短,在提取暂态主频分量时会发生一定概率的频率偏移,但通过故障点上下游暂态主频分量能量的差异仍能准确判断故障区段。即使在故障初相角较小、过渡电阻较大的故障情况下,故障区段的能量相对熵值都明显大于健全区段的能量相对熵值。大量的仿真数据表明,在不同的故障点位置、不同故障角、不同过渡电阻的故障条件下发生单相接地故障时,本文方法都能准确的定位故障区段,算法对噪声具有一定的鲁棒性。

5.3 算法对比

为了验证本文所提故障定位方法的优越性,从信号分解和应用对象两个方面来详细分析。

1) 信号分解

EMD 作为目前常用的信号分解方法,已被广泛的应用于小电流接地故障选线和定位<sup>[21]</sup>。利用 EMD 分解本文第 3 节故障条件下获得的零序电流,原始信号和 IMF1 分量如图 9 所示,IMF1 Hilbert 边际谱如图 10 所示。

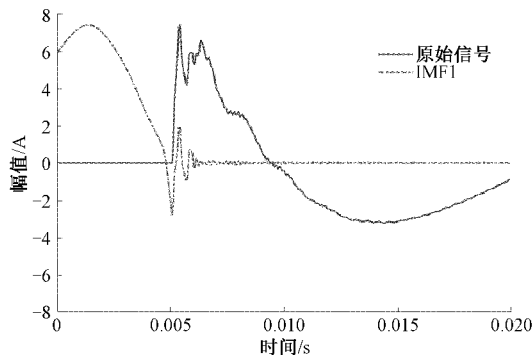


图 9 原始信号与 IMF1 分量对比图

从图 9 中可知,相较于 VMD,EMD 在处理突变信号时并不理想,IMF1 分量前 0.005 s 之前的波形相比于原始信号发生畸变,且由图 10 可以明显看出在频率 2 000 Hz 和 5 000 Hz 附近出现能量聚集,存在模态混叠现象。

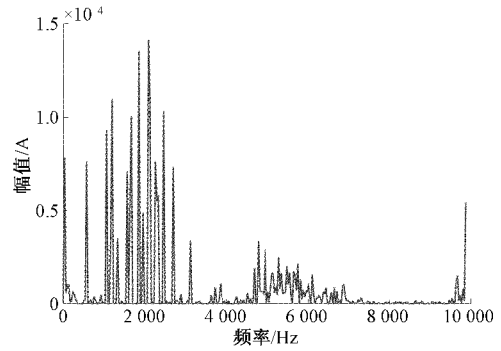


图 10 IMF1 Hilbert 边际谱

2) 应用对象

文献[22]利用 VMD 分解暂态零序电流,计算相邻检测点各 IMF 分量的能量相对熵,然后相加来衡量相邻检测点暂态零序电流的能量相似度。文献[23]利用暂态零序电流 Prony 主导分量相对熵来描述故障区段和健全区段的差异,改变谐振接地系统消弧线圈的过补偿度  $p=5\%$ ,各检测点暂态零序电流主导分量如图 11 所示。

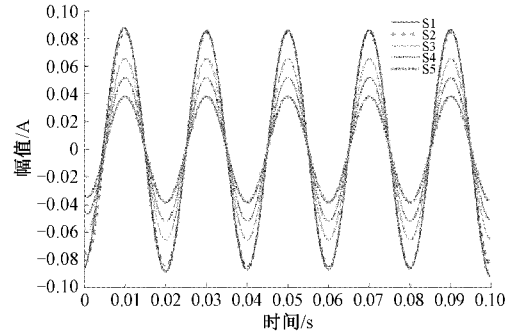


图 11 各检测点暂态主导分量对比

据前述理论可知,谐振接地系统发生单相接地故障时由于消弧线圈对暂态零序电流稳态工频分量的补偿作用,故障点上游检测点 S1 和下游检测点 S2 暂态主导分量的波形和幅值差异并不明显,计算可得各区段熵值如表 5 所示。

表 5 其它方法熵值计算结果

文献/p	$f / R_1 / \varphi /$	$S_1 - S_2$ (a)	$S_2 - S_3$ (b)	$S_3 - S_4$ (c)	$S_4 - S_5$ (d)	定位结果
文献[22] $p=8\%$	$f_1 / 10\Omega / 90^\circ$	0.343 3	5.676 6	0.594 4	0.920 4	✓
	$f_2 / 50 \Omega / 45^\circ$	0.250 4	0.115 2	4.227 8	1.104 8	✓
	$f_3 / 100 \Omega / 0^\circ$	2.345 3	0.090 6	0.072 9	4.757 3	✓
文献[23] $p=8\%$	$f_1 / 10\Omega / 90^\circ$	342.72	1 236.56	200.26	170.04	✓
	$f_2 / 50 \Omega / 45^\circ$	343.59	317.56	4 602.88	343.59	✓
	$f_3 / 100 \Omega / 0^\circ$	603.22	133.85	130.10	2 602.21	✓
文献[23] $p=5\%$	$f_1 / 100 \Omega / 0^\circ$	122.40	135.08	165.33	98.66	✗
本文方法 $p=5\%$	$f_1 / 100 \Omega / 0^\circ$	6 908.38	79.10	132.98	266.59	✓

从表 5 分析可知,文献[22]所用的故障定位算法受故障过渡电阻的影响较大,随着过渡电阻的增大,其故障区

段和健全区段的熵值差异在逐渐缩小,在高阻接地故障情况下易造成误判。改变消弧线圈过补偿度,由于消弧线圈

对暂态主导分量的补偿作用,文献[23]无法作出正确的判断,而本文方法可以确保在不同补偿度下准确提取暂态主频分量,具有良好的自适应性及稳定性。

## 6 结 论

通过参数优化 VMD 分解故障零序电流,进而求取各 IMF 分量的 Hilbert 边际谱,得到暂态零序电流在整个频段上的能量分布情况,利用能量相对熵表征相邻检测点暂态主频分量的能量差异,熵值最大的即为故障区段。

本文利用的故障信息仅包含零序电流,在一定程度上减少了需要上传主站的数据量;对 VMD 参数自适应寻优,有效避免了参数经验法带来的分解偏差;故障定位的结果不受故障点位置、过渡电阻和故障初相角影响。且比起利用零序电流稳态分量的定位方法,受噪声的影响较小且故障区段相邻检测点的熵值远大于健全区段相邻检测点的熵值,一定程度上提高了定位的准确性。在某些特殊情况下,如故障上下游等效网络一致时,本文方法可能失效,需进一步研究辅助判据来实现故障区段的准确定位。

## 参考文献

- [1] 贺家李,李永丽,董新洲,等. 电力系统继电保护原理[M]. 北京:中国电力出版社,2010.
- [2] 韦明杰,石坊,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.
- [3] 简孔斌,王玲,徐柏榆,等. 基于节点阻抗矩阵和电压暂降的故障定位新方法[J]. 广东电力, 2014, 27(10): 84-89.
- [4] 彭华,朱永利,袁胜辉,等. 风电场集电线路单相接地故障组合测距[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(9):88-97.
- [5] 高艳丰,朱永利,阎红艳. 一种新型的输电线路双端行波故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8):8-13.
- [6] 方涛,陈豪威,王媛媛,等. 基于主频分量相关性的谐振接地配电网故障定位方法[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(1): 88-92.
- [7] 胡安平,姜玉洁,陶以彬,等. 基于小波能量熵的配电网电压暂降源定位方法[J]. 电工电能新技术, 2021, 40(5):50-56.
- [8] 李胜辉,白雪,董鹤楠,等. 基于小波与栈式稀疏自编码器的电力电缆早期故障定位方法研究[J]. 国外电子测量技术, 2019, 294(5):146-151.
- [9] 陈剑,夏康,黄凯旋,等. 基于 VMD 相对能量熵和自适应 ARMA 模型的轴承性能退化趋势动态预警[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(8):116-1123.
- [10] 张林利,葛珍珍,张世栋,等. 利用暂态频率比较的配电网单相接地定位方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(12):135-138.

- [11] 徐艳春,赵彩彩,孙思涵,等. 基于改进 LMD 和能量相对熵的主动配电网故障定位方法[J]. 中国电力, 2021, 54(11):133-143.
- [12] 薛永端,李娟,徐丙垠. 中性点不接地系统小电流接地故障暂态等值电路的建立[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 223-232.
- [13] 薛永端,李天友,李伟新,等. 小电流接地故障暂态分析及区段定位新方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(23):101-107.
- [14] 李振兴,王鹏飞,王新,等. 基于幅值特征和 Hausdorff 距离的配电网故障定位方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(7):197-177.
- [15] 刘美容,刘津涛,何怡刚. 基于 EMD 复合多尺度熵的模拟电路故障诊断方法[J]. 电子测量技术, 2021, 360(4):51-56.
- [16] DRAGOMIRETSKIY K, ZOSSO D. Two-dimensional variational mode decomposition[J]. IEEE Trans on signal processing, 2014, 62(3):531-544.
- [17] 崔二杰,舒征宇,汪俊,等. 基于 VMD-LSTM 的小电流接地系统故障选线方法[J]. 电工电能新技术, 2021, 40(1):70-80.
- [18] 刘建昌,权贺,于霞,等. 基于参数优化 VMD 和样本熵的滚动轴承故障诊断[J/OL]. 自动化学报:1-12, DOI: 10.16383/j. aas. 190345.
- [19] 罗亦冰,姚官斌,黄城,等. 基于改进 VMD 的变形特征提取与分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(4):612-619.
- [20] 唐贵基,王晓龙. 参数优化变分模态分解在滚动轴承早期故障诊断中的应用[J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(5):73-81.
- [21] 徐舜,杨毅,王奕,等. 基于 IMF 能量矩和 SVM 的电力线路故障定位[J]. 电测与仪表, 2015, 52(11): 117-123.
- [22] 田录林,王伟博,田琦,等. 基于 VMD 能量相对熵的配电网单相接地故障选线方法[J]. 电气应用, 2019, 38(3):47-53.
- [23] 李然月,王朝立,王晓卫. 基于 Prony 相对熵的输电线路故障综合定位方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(4):56-61,67.

## 作者简介

杜政奇,硕士,主要研究方向为电力系统配电网故障诊断。

E-mail:1427347092@qq.com

王敬华(通信作者),研究员,主要研究方向为配电网自动化。

E-mail:wangjh@kehui.cn

张新慧,教授,主要研究方向为智能配电网保护与控制。

E-mail:zhxh626@126.com