

基于组合模量S变换能量熵的 配电网故障选线方法

商立群, 李瑶

(西安科技大学电气与控制工程学院, 710054, 西安)

摘要: 针对目前含逆变型分布式电源配电网故障选线方法无法在各种故障类型下准确选线的问题,提出一种利用组合模量特征结合S变换算法和信息熵理论的有源配电网故障选线方法。提取配电网各出线端的电流信号,通过组合模量行波电流变换以消除在不同故障类型下故障特征失效的情况;将组合模量行波电流进行S变换以提取故障信号处的幅值和相角信息,结合信息熵理论通过故障信号最大幅值处的短窗数据在多频段下求取各条出线的多尺度能量熵;通过故障线路与非故障线路之间能量熵差值的实例分析,选取差值最大的频段作为求解能量熵的固定频段以减少运算量;以各条出线固定频段下的熵值大小作为判据来定位故障线路。数值仿真结果表明,该方法对各种故障类型均能准确地选出故障线路,且不受故障初始角、故障距离以及过渡电阻的影响,特别是在高阻情况下仍然能够实现准确、高效的故障选线。

关键词: 含逆变型分布式电源配电网;组合模量;S变换;能量熵;故障选线

中图分类号: TM76 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202205012 **文章编号:** 0253-987X(2022)05-0119-08



OSID 码

Faulty Line Identification in Distribution Network Based on Combined Modulus and S-Transform Energy Entropy

SHANG Liqun, LI Yao

(School of Electrical and Control Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: In view that some existing methods cannot identify accurately a faulty line in the distribution network with inverter-interfaced distributed generation (IIDG), a method of faulty line identification in active distribution network is proposed based on combined modulus characteristics, S-transform algorithm and information entropy theory. Firstly, the current signal at each outlet end of the distribution network is extracted, and the failure of fault characteristics under different fault types is eliminated through combined modulus-based traveling wave current transformation. Secondly, the combined modulus traveling wave current is S-transformed to extract the amplitude and phase angle information at the fault signal, and the multiscale energy entropy of each outgoing line is obtained in multiple frequency bands by basing on the information entropy theory and the short window data at the maximum value of fault signal. Thirdly, the energy entropy difference between the faulty line and the non-faulty line is analyzed, and the frequency band with the largest difference is selected as the fixed frequency band for solving the energy entropy to reduce the amount of calculation. Finally, the entropy value of each outgoing

line in a fixed frequency band is used as a criterion to locate the faulty line. Numerical simulation results show that the proposed method can accurately identify the fault line for various types of faults, and is not affected by the initial angle of the fault, the fault distance and the transition resistance. It can still accurately and efficiently identify the fault line, especially in the case of high resistance.

Keywords: distribution network with inverter-interfaced distributed generation; combined modulus; S-transform; energy entropy; faulty line identification

配电网作为电力系统运行中电能分配和传送的关键组成部分^[1-4],是电网和用户能量交换的节点。我国配电网多是小电流接地方式^[5],由于大部分配电网线路短而多,网络结构复杂,导致故障发生时定位困难。约90%的电力系统运行故障发生在配电网中^[6-7],所以这对配电网的安全可靠运行提出了较高的要求,即在配电网发生故障后,能够及时准确地识别故障的位置并做出反应,消除隐患^[8-10]。

由于配电网主变压器低压侧母线上有大量出线连接,为了进一步提高故障定位的效率,在进行配电网故障定位前,有必要先选择出低压侧母线的故障出线。逆变型分布式电源(inverter interfaced distributed generator, IIDG)的大量接入,配电网的网络结构变得更为复杂^[11-12],故障选线的难度也逐渐增加。IIDG接入电网后,会改变各相的故障电流分布,但是不会改变各线首端的零序电流之间的幅值差和极性差^[13],因此,基于暂态零序量的故障选线取得了大量成果。

文献[14]利用故障后零序电荷与零序电压之间的特征故障关系,结合支持向量机对故障线路进行选线,支持向量机在小样本的分类方面具有优势,但是大样本的分类准确率较低,且识别能力易受自身参数的影响;文献[15-16]利用小波分析暂态零序电流选择故障线路,但是适用范围有限,会受到小波基函数选择和分解程度等的影响;文献[17-18]利用行波初始波头的时间差进行定位,但是实际配电网线路复杂,实用性较差,且行波法对采样同步性要求高,工程应用中易出错;文献[19-20]利用S变换选择故障线路,可以有效提取一定频带内暂态信号的极性或能量特征,但是仍局限于单相故障的识别。

针对上述方法的局限性,本文利用组合暂态模量对各种故障类型(接地故障及相间短路故障)进行识别,并求取各条线路各自的能量熵,从而克服了传统信号采集要求严格同步的缺点。该方法通过S变换对故障信号提取幅值及相角信息,结合信息熵理论,利用最大幅值信息的短窗数据求取能量熵,从而

对系统的无序程度给出一个确定的度量,并通过对能量熵大小的比较来选择故障线路;最后利用S变换多尺度能量熵进行对比,选出最合适的采样频率。实验结果表明,所提方法实现简单,且不受故障位置、接地电阻、故障类型、故障初始角等因素影响,具有广泛的应用价值。

1 组合相模变换

由于三相交流线路的电磁耦合现象^[21],在配电网线路发生不对称故障后,会导致三相电气量出现不平衡,所以选择合适的相模变换方法对三相耦合线路进行解耦十分重要。一般的相模变换包括对称分量法、Karenbauer变换和Clark变换等。对称分量法涉及复数运算,适用于稳态分析。实际工程应用中,配电网故障暂态过程大多涉及复杂的计算,对计算量和速度要求严格,一般宜采用实数变换矩阵,例如Karenbauer变换或Clark变换进行相模变换,通过实数变换矩阵将相域信号变换为模域信号。在不同的故障类型中一般会采用不同的模域信号,零模分量损耗大且随频率的变化较大,参数稳定性较差,所以尽量避免选择零模分量作为配电网故障选线的信号^[22],目前的研究中一般采用线模分量作为测量对象。本文采用Clark电流变换,Clark电流变换表达式为

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & \sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: I_0 、 I_α 、 I_β 分别为相电流 I_a 、 I_b 、 I_c 经Clark变换后的零模分量、 α 模分量和 β 模分量。

由式(1)可知,当B、C两相发生短路时, $I_a=0$ 且 $I_b+I_c=0$,所以 $I_\alpha=2I_a-(I_b+I_c)=0$ 。当A相发生单相接地短路时, $I_b=I_c$,所以 $I_\beta=I_b-I_c=0$ 。

由以上分析可知,受变换矩阵限制,无法利用单一线模分量对各种故障类型进行识别。针对此类情况,本文引入Clark变换组合模量^[23]形式,以消除不同故障特征失效的情况。Clark变换后的组合模

量如下式

$$\Delta i_z = K \Delta I_\alpha + \Delta I_\beta \tag{2}$$

式中: i_z 为组合模量行波电流; K 为组合系数。

2 S 变换和信息熵

当配电网中线路发生故障时,频率的变化会引起故障信号能量的变化。本文利用多尺度能量熵来描述故障信号的能量随频率变化的分布情况,从而选定最佳频段来计算组合模态能量熵。组合模态能量熵是基于 S 变换分解方法的,通常信号的内部特征和状态变化常常体现在其频率组成结构和特征的变化,因此需要将时域故障信号通过 S 变换映射到频域中进行频谱结构的分析,以便了解系统的动态特性和变化规律,再利用信息熵理论对 S 变换后的频域信号进行求解,从而利用其熵值对系统的紊乱程度给出一个确定的度量。

2.1 S 变换理论

S 变换是一种兼具连续小波变换和短时傅里叶变换优点的变换方式,既具有短时傅里叶变换时频分析的能力,又承袭小波变换频率随时间窗口的宽度和高度变换的特点。配电网变压器低压侧各出线的能量与幅值信息可通过 S 变换直接获得。

设某出线的特征行波电流连续时间信号为 $h(t)$, 则其连续 S 变换 $S(\tau, f)$ 如下式

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) g(\tau - t, f) e^{-i2\pi ft} dt \tag{3}$$

$$g(\tau - t, f) = (2\pi)^{-1/2} |f| e^{-\frac{(\tau - t)^2}{2\sigma^2}} \tag{4}$$

式中: $g(\tau - t, f)$ 为高斯窗口; τ 为控制高斯窗口的位置参数; $\sigma = 1/|f|$ 。

对式(3)进行离散化,可以得到反映该信号时频特性的复矩阵如下式

$$\begin{cases} S[kT, \frac{n}{NT}] = \sum_{r=0}^{N-1} h(\frac{r+n}{NT}) e^{-\frac{2\pi^2 r^2}{n^2}} e^{i\frac{2\pi rn}{N}}, & n \neq 0 \\ S[kT, 0] = \frac{1}{N} \sum_{r=0}^{N-1} h(\frac{r}{NT}), & n = 0 \end{cases} \tag{5}$$

式中: $h(\frac{n}{NT}) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} h(kT) e^{-j\frac{2\pi kn}{N}}$, $n = 0, 1, \dots, N-1$; T 为采样间隔; N 为采样点数。

2.2 Shannon 信息熵

信息熵具有描述系统内在信息的能力,是一种反映系统状态不确定性的度量指标。信息熵是从平均意义上表征信源总体信息测度的一个量,能够相对合理地反映数据特征的相似性。信息熵越大,信

息量就越多,数据间的相似度就越高。1948 年 Shannon^[24] 提出信息熵,并定义信息熵为自信息的数学期望,其数学表达式如下式

$$H(x) = E[-\lg P(x_i)] = - \sum_{i=1}^a P(x_i) \lg P(x_i) \tag{6}$$

式中: $x = \{x_1, x_2, \dots, x_a\}$ 为事务集; $P(x_i)$ 为对应事务的概率值; $H(x)$ 为 x 的信息熵。

2.3 S 变换能量熵

当配电网线路发生故障时,故障信号通常会表现出一定的非线性和非平稳性特征,S 变换能量熵可以从时间和频率两方面综合体现故障信号的能量分布情况,更适合提取暂态非平稳信号特征。

图 1 给出了 10 kV 含 IIDG 的配电网故障选线模型,L1~L4 为配电出线,M1~M4 为信号测量单元。当 L1 线路发生故障时,故障线路组合模量行波电流及其 S 变换后的幅值-时间曲线如图 2 所示,同一频率下各条线路组合模量电流 S 变换后的能量

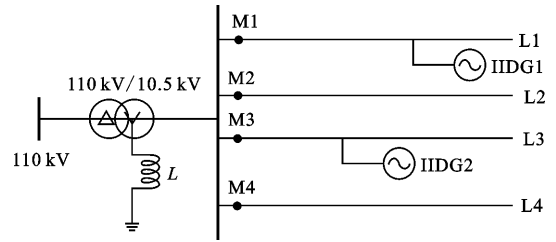
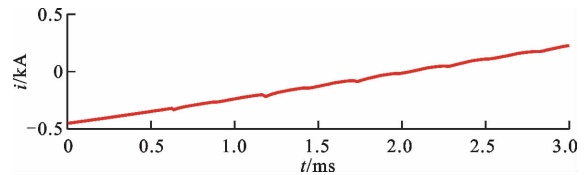
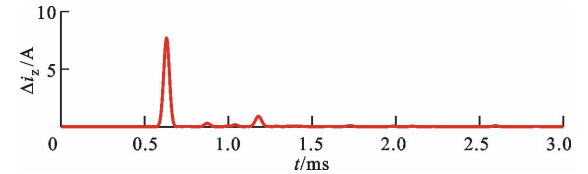


图 1 含 IIDG 的配电网故障选线模型
Fig. 1 Fault line selection model of distribution network with IIDG



(a) 组合模量电流的波形



(b) 组合模量电流经 S 变换后的波形

图 2 L1 线路发生单相接地故障时的组合模量行波电流及其 S 变换后的幅值-时间曲线

Fig. 2 Combined modulus traveling wave current and its amplitude-time curve after S-transformation when single-phase grounding occurs on line L1

波形如图 3 所示。由图 2 和图 3 可以看出,暂态组合模量行波电流的突变点与 S 变换后波形的幅值-时间曲线一一对应,在 S 变换后,故障线路暂态组合模量行波电流的能量幅值明显大于非故障线路。

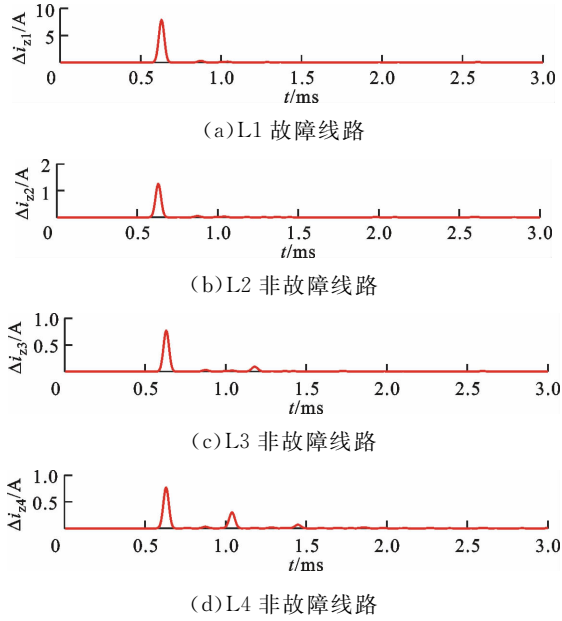


图 3 各条线路组合模量电流 S 变换后的波形
Fig. 3 Waveforms of combined modulus current of each line after S-transformation

通过对 S 变换能量熵^[25]进行分析,对每条出线首端监测点检测到的组合模量行波电流进行 S 变换,同时为了有效验证最佳能量熵的作用频率段,选择 100 个不同频率下的时间信号序列分别求其能量熵,如图 4 所示,频率低于 1 kHz 时,故障线路与非故障线路的差异值较小,不利于构成判据,当频率大于 3 kHz 时,差异值逐渐减小,说明故障线路与非故障线路间的能量熵差异值不会随着频率的增加而一直增加。综合考虑,本文取 S 变换后 2.5 kHz 的

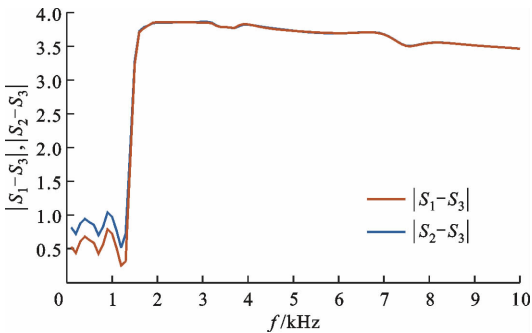


图 4 不同频率下故障线路 L3 分别与非故障线路 L1 和 L2 的能量熵差异值
Fig. 4 Energy entropy difference between failed line L3 and non-failed line L1 and L2 at different frequencies

数据来求解 S 变换能量熵。

S 变换能量熵的求解步骤如下:

(1)第 m 个测量单元测得组合行波模量电流信号 $i_{zm}(m=1,2,3,4)$,信号经 S 变换后得到复时频矩阵,记为 S 矩阵,将 S 的各个元素求模,得到模时频矩阵 A 。

(2)取 S 变换后频率 2.5 kHz 下,组合模量行波电流行波波头前后 0.25 ms 内的短窗数据(即组合模量行波电流波头前 50 个数据点,波头后 49 个数据点,共 100 个数据点)。

(3)定义该线路不同采样点 $n(n=1,2,\cdots,100)$ 的能量 E_{nm} 之和为 E_m ,其中 $E_m = \sum_{n=1}^{100} |A_{nm}|^2$, A_{nm} 为第 m 个测量单元在频率 2.5 kHz 下第 n 个点的电流数据。信号总能量为 $E = \sum_{m=1}^M E_m$, M 表示测量单元的总数,本文 $M=4$ 。定义 p_{nm} 为信号的第 n 个采样点能量与信号总能量的比,即 $p_{nm} = \frac{E_{nm}}{E}$,

$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^{100} p_{nm} = 1$ 。于是第 m 个测量单元的组合模态行波电流在 2.5 kHz 频率下的 S 变换能量熵 S_m 为

$$S_m = - \sum_{n=1}^{100} p_{nm} \lg p_{nm} \quad (7)$$

3 算例分析

综合以上分析,利用暂态组合模量行波电流的故障特征,对其进行 S 变换,以变换后某一适当频率下的数据为基础求取相应的能量熵进行比较,从而判断出故障线路,理论上是可行的。配电网故障选线步骤如图 5 所示。

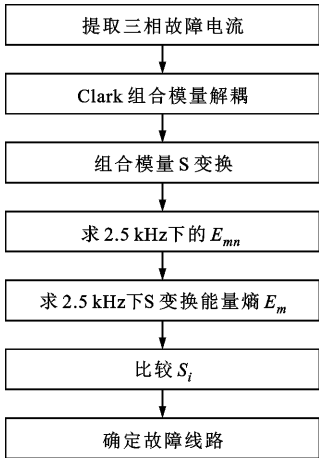


图 5 配电网故障选线步骤

Fig. 5 Steps of fault line selection for distribution network

利用 PSCAD 软件搭建如图 1 所示仿真模型,该模型采用 4 条馈线输出方式,其中 L1 和 L2 为电缆线路,L3 和 L4 为架空线路;线路 1 的长度为 70 km,距母线 40 km 处接 IIDG1;线路 2 的长度为 80 km;线路 3 的长度为 80 km,距母线 30 km 处接 IIDG2;线路 4 的长度为 60 km。IIDG 均采用恒功率的输出控制方式。线路和 IIDG 具体参数分别如表 1、表 2 所示。

表 1 仿真模型中的线路参数

Table 1 Line parameters of the simulation model

线路类型	相序	$R/$	$L/$	$C/$
		$(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	$(\text{mH} \cdot \text{km}^{-1})$	$(\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1})$
电缆线路	正序	0.11	0.52	0.290
	零序	0.34	1.54	0.190
架空线路	正序	0.17	1.20	0.010
	零序	0.23	5.48	0.006

表 2 仿真模型中的 IIDG 参数

Table 2 IIDG parameters of the simulation model

IIDG	变压器	滤波器参数	P/kW	Q/kVA
1	10·0.4	$L=0.004\text{H}$	200	0
		$C=10\ \mu\text{F}$		
		$R=0.01\ \Omega$		
2	10·0.4	$L=0.004\text{H}$	300	0
		$C=10\ \mu\text{F}$		
		$R=0.01\ \Omega$		

本文消弧线圈采用系统补偿度 k_c 为 10% 的过补偿方式,由下式计算消弧线圈电感

$$L=\frac{1}{\omega^2C_{\text{eq}}(1+k_c)}$$

(8)

式中: $\omega=2\pi f$, $f=50\text{ Hz}$; $C_{\text{eq}}=3(C_1+C_2+\cdots+C_M)$ 为配电网中所有支路总的对地电容, $C_1,C_2,\cdots,C_M$ 分别表示 M 条线路的零序电容,本文 $M=4$,各线路零序电容数据参考表 1。

在 IIDG1、IIDG2 均未接入配电网时,L1、L3、L4 线路上分别发生单相接地,各条线路组合模量行波电流的 S 变换能量熵如表 3 所示。由表 3 可以看出,在传统配电网中,故障线路的 S 变换能量熵远大于非故障线路,由此可以对故障线路进行选线。

为了进一步验证本文所提方法的泛化性和优势,在逆变型分布式电源接入配电网的情况下,模拟不同故障类型、故障初始角、故障过渡电阻以及故障距离下的故障情形。

表 3 各条线路组合模量行波电流的 S 变换能量熵

Table 3 S-transform energy entropy of combined modulus traveling wave current of each line

故障出线	S 变换能量熵			
	S_1	S_2	S_3	S_4
L1	4.520	0.226	0.023 0	0.022 0
L3	0.230	0.285	4.412 0	0.031 3
L4	0.235	0.240	0.013 2	4.390 0

3.1 故障类型的影响

设故障初始角为 25° ,过渡电阻为 $100\ \Omega$,故障距离为 30 km,在 L1 线路上模拟不同故障类型,其仿真结果如表 4 所示。AG 为 A 相接地故障;ABG 为 AB 两相接地故障;BC 为 BC 两相故障;ABC 为三相故障。由表 4 可见,故障线路的 S 变换能量熵 S_1 远大于非故障线路的能量熵,表明在配电网接入 IIDG 的情况下,不仅可以对单相故障进行准确选线,并且该方法不受故障类型的影响,可以对不同故障类型进行准确选线。

表 4 不同故障类型的仿真结果

Table 4 The influence of different types of faults

故障出线	故障类型	S 变换能量熵			
		S_1	S_2	S_3	S_4
L1	AG	4.468	0.246	0.026	0.023
	ABG	4.437	0.308	0.028	0.024
	BC	4.440	0.290	0.026	0.023
	ABC	4.430	0.304	0.030	0.026

3.2 故障初始角的影响

设故障类型为 L2 线路 A 相接地故障,故障距离首端为 30 km,过渡电阻为 $200\ \Omega$ 。当不同故障初始角时 S 变换能量熵结果如表 5 所示,由表 5 可

表 5 不同故障初始角对 S 变换能量熵的影响

Table 5 The influence of different fault initial angles

故障出线	故障初始角/ $^\circ$	S 变换能量熵			
		S_1	S_2	S_3	S_4
L2	5	0.285	4.457	0.022 8	0.019 0
	25	0.289	4.454	0.022 9	0.018 8
	45	0.292	4.453	0.023 0	0.018 8
	100	0.294	4.453	0.023 0	0.019 0
	120	0.293	4.452	0.023 0	0.019 0
	145	0.290	4.454	0.023 0	0.018 6
	170	0.289	4.456	0.022 8	0.018 0

见,在故障初始角极小时,仍然可以准确选线,选线结果不受故障初始角的影响。

3.3 故障距离的影响

设置故障类型为 AC 相接地故障,故障初始角为 25° ,过渡电阻为 $50\ \Omega$,在 L3 线路上模拟不同故障距离,其仿真结果如表 6 所示。仿真结果验证了算法在不同故障距离,特别是在近母线处故障以及近分布式电源处故障的有效性。

表 6 不同故障距离对 S 变换能量熵的影响
Table 6 The influence of different fault distances

故障 出线	故障距离/ km	S 变换能量熵			
		S_1	S_2	S_3	S_4
L3	0.5	0.307	0.306	4.299	0.039
	25	0.224	0.333	4.376	0.068
	29.5(DG 上游)	0.235	0.232	4.348	0.078
	30.5(DG 下游)	0.241	0.238	4.315	0.081
	55	0.289	0.283	4.330	0.021
	89	0.250	0.250	4.350	0.011

3.4 过渡电阻的影响

设置故障类型为在 L4 线路上 B 相接地故障,故障距离为 48 km,故障初始角为 25° ,模拟不同过渡电阻对算法准确性的影响,结果如表 7 所示。由仿真结果可以看出,在 $3\ 000\ \Omega$ 的过渡电阻下,故障线路能量熵仍明显大于其他线路,且故障线路与非故障线路的能量熵相差依然很大,说明在高阻接地时方法仍然适用。

3.5 噪声的影响

L1 线路故障时,在 M1 处测得组合模量行波电流原始信号和添加信噪比 R_{sn} 为 35 dB 的高斯白噪声后的信号如图 6 所示。为了进一步验证噪声干扰的影响,L2、L3 模拟线路上发生随机故障,仿真结果

表 7 不同过渡电阻对 S 变换能量熵的影响
Table 7 The influence of different transition resistances

故障 出线	过渡电阻/ Ω	S 变换能量熵			
		S_1	S_2	S_3	S_4
L4	5	0.212	0.201	0.023	4.413
	100	0.570	0.255	0.029	4.375
	300	0.301	0.295	0.037	4.285
	500	0.314	0.301	0.049	4.252
	1 000	0.346	0.337	0.075	4.210
	2 000	0.413	0.399	0.155	4.067
	3 000	0.486	0.467	0.261	3.890

如表 8 所示,可以看出随着 R_{sn} 的减小(高斯白噪声水平升高),故障线路与非故障线路的能量熵差异值也随之减小,但是在一定程度上,依然能正确选择故障出线。

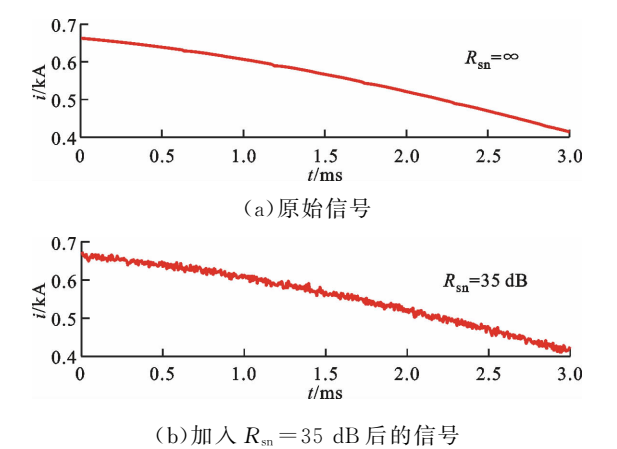


图 6 故障线路组合模量行波电流的原始信号以及加入高斯白噪声后的信号

Fig. 6 The original signal of the combined modulus traveling wave current of the fault line and the signal after adding Gaussian white noise

表 8 高斯白噪声对 S 变换能量熵的影响
Table 8 The influence of Gaussian white noise

故障 出线	$R_{sn}/$ dB	故障 类型	故障距离/ km	故障初始角/ ($^{\circ}$)	过渡电阻/ Ω	S 变换能量熵			
						S_1	S_2	S_3	S_4
L2	30	AG	15	25	200	1.479	3.032	0.720	0.590
	50	BCG	45	45	10	0.420	4.246	0.060	0.042
	70	AC	67	120		0.250	4.463	0.022	0.025
L3	30	BG	30	45	5	1.122	1.031	3.143	0.576
	50	ABC	70	100		0.580	0.490	4.302	0.071
	70	BG	48	25	1 000	0.380	0.360	4.195	0.073

4 结 论

为了解决传统故障选线方法无法对各种故障进行有效识别的问题,本文利用模量特征结合S变换能量熵理论,提出了一种基于组合模量S变换能量熵的配电网故障选线方法。通过分析与仿真实验可得以下结论:

(1)利用组合模量能对各种短路故障特征进行识别的特点,本文所提方法克服了传统故障选线中仅针对单一故障(单相接地故障)这一缺点,可以对各种故障进行选择识别;

(2)利用各条线路组合模量行波电流S变换后各自波头的短窗数据计算能量熵,克服了传统行波法进行故障选线时,各条线路采样信号需严格同步的缺点;

(3)由实验算例可知,所提方法可用于架空线路或电缆线路配电网中,并且该方法对接地故障的高阻过渡电阻有较好的包容性,在含分布式电源的配电网中对近母线和近分布式电源处的故障均能准确识别,具有一定的抗噪能力。

参考文献:

- [1] 冯光,管廷龙,王磊,等. 利用电流-电压导数线性度关系的小电流接地系统接地故障选线[J]. 电网技术, 2021, 45(1): 302-311.
FENG Guang, GUAN Tinglong, WANG Lei, et al. Grounding fault line selection of non-solidly grounding system based on linearity of current and voltage derivative [J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 302-311.
- [2] ABOSHADY F M, THOMAS D W P, SUMNER M. A wideband single end fault location scheme for active untransposed distribution systems [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(3): 2115-2124.
- [3] 王秀丽,张择策,侯雨伸. 主动配电网多维度静态安全评估[J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(8): 110-116.
WANG Xiuli, ZHANG Zece, HOU Yushen. Multi-dimensional static security assessment of active distribution network [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(8): 110-116.
- [4] 冯光,管廷龙,王磊,等. 利用电流-电压导数线性度关系的小电流接地系统接地故障选线[J]. 电网技术, 2021, 45(1): 302-311.
FENG Guang, GUAN Tinglong, WANG Lei, et al. Ground fault line selection for small current grounding

system using current-voltage derivative linearity relationship [J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 302-311.

- [5] 徐丙垠,薛永端,冯光,等. 配电网接地故障保护若干问题的探讨[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(20): 1-7.
XU Bingyin, XUE Yongduan, FENG Guang, et al. Discussion on several problems of earthing fault protection in distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(20): 1-7.
- [6] 王雪文,石访,张恒旭,等. 基于暂态能量的小电流接地系统单相接地故障区段定位方法[J]. 电网技术, 2019, 43(3): 818-825.
WANG Xuewen, SHI Fang, ZHANG Hengxu, et al. A single-phase earth fault location method based on transient energy for non-effectively grounded system [J]. Power System Technology, 2019, 43(3): 818-825.
- [7] 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.
- [8] 王宾,崔鑫,董新洲. 配电线路弧光高阻故障检测技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 96-107.
WANG Bin, CUI Xin, DONG Xinzhou. Summary of arc high-resistance fault detection technology for distribution lines [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 96-107.
- [9] 高锋阳,李昭君,袁成,等. 量子计算和免疫优化算法相结合的有源配电网故障定位[J]. 高电压技术, 2021, 47(2): 396-406.
GAO Fengyang, LI Zhaojun, YUAN Cheng, et al. Active distribution network fault location based on the combination of quantum computing and immune optimization algorithm [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(2): 396-406.
- [10] 束洪春. 配网选线保护与故障定位[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [11] 刘渝根,王建南,马晋佩,等. 结合小波包变换和5次谐波法的谐振接地系统综合故障选线方法[J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1519-1525.
LIU Yugen, WANG Jiannan, MA Jinpei, et al. Comprehensive fault line selection method for resonant grounded system combining wavelet packet transform

- with fifth harmonic method [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5): 1519-1525.
- [12] 徐铭铭, 秦苏亚, 冯光, 等. IIDG 对小电流接地故障谐波特征及其对选线的影响分析 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(1): 107-114.
- XU Mingming, QIN Suya, FENG Guang, et al. Analysis of influences of IIDG on harmonic characteristics under small-current grounding fault and line selection [J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2021, 33(1): 107-114.
- [13] 高杰, 程启明, 程尹曼, 等. 基于量子遗传双稳态系统的配电网故障选线方法 [J]. 电力自动化设备, 2018, 38(5): 164-170.
- GAO Jie, CHENG Qiming, CHENG Yinman, et al. Faulty line selection method based on quantum genetic bistable system for distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(5): 164-170.
- [14] 张姝, 何正友, 王玘, 等. 暂态零序电荷-电压特征与支持向量机结合的谐振接地系统故障选线研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(12): 71-78.
- ZHANG Shu, HE Zhengyou, WANG Qi, et al. Fault line selection of resonant grounding system based on the characteristics of charge-voltage in the transient zero sequence and support vector machine [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(12): 71-78.
- [15] 刘天明, 刘建锋, 肖贤贵, 等. 基于小波奇异熵和支持向量机的配电网单相接地选线新方法 [J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(2): 14-20.
- LIU Tianming, LIU Jianfeng, XIAO Xiangui, et al. A novel approach to fault line selection in distribution networks based on wavelet singularity entropy and supporting vector machine [J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(2): 14-20.
- [16] 束洪春, 朱梦梦, 黄文珍, 等. 基于暂态零序电流时频特征量的配网故障选线方法 [J]. 电力自动化设备, 2013, 33(9): 1-6.
- SHU Hongchun, ZHU Mengmeng, HUANG Wenzhen, et al. Faulty line selection based on time-frequency characteristics of transient zero-sequence current [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(9): 1-6.
- [17] 张健, 王奕, 曾祥君, 等. 基于多端行波到达时差的配电网故障选线方法 [J]. 电力科学与技术学报, 2016, 31(4): 51-57.
- ZHANG Jian, WANG Yi, ZENG Xiangjun, et al. A novel fault line detection method with the time difference of multi-terminal detected traveling waves for distribution networks [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2016, 31(4): 51-57.
- [18] 梁睿, 崔连华, 都志立, 等. 基于广域行波初始波头时差关系矩阵的配电网故障选线及测距 [J]. 高压技术, 2014, 40(11): 3411-3417.
- LIANG Rui, CUI Lianhua, DU Zhili, et al. Fault line selection and location in distribution power network based on traveling wave time difference of arrival relationships [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(11): 3411-3417.
- [19] 张钧, 何正友, 贾勇. 基于 S 变换的故障选线新方法 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(10): 109-115.
- ZHANG Jun, HE Zhengyou, JIA Yong. Fault line identification approach based on s-transform [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(10): 109-115.
- [20] 陈豪威, 王媛媛, 唐夏菲, 等. 基于 S 变换暂态能量与方向的无整定配电网选线新方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 71-78.
- CHEN Haowei, WANG Yuanyuan, TANG Xiafei, et al. A new fault line selection method for distribution network system based on transient energy and direction of S-transformation [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 71-78.
- [21] DAISY M, DASHTI R. Single phase fault location in electrical distribution feeder using hybrid method [J]. Energy, 2016, 103: 356-368.
- [22] 孙晓辉. 基于暂态行波的配电网故障定位分析 [D]. 青岛: 山东科技大学, 2020.
- [23] 白嘉, 徐玉琴, 王增平, 等. 基于组合模量的行波电流极性比较式方向保护原理 [J]. 电网技术, 2005, 29(13): 69-72.
- BAI Jia, XU Yuqin, WANG Zengping, et al. Principle of combination modulus based traveling wave current directional protection with polarity comparison [J]. Power System Technology, 2005, 29(13): 69-72.
- [24] SHANNON C E. A mathematical theory of communication [J]. ACM SIGMOBILE: Mobile Computing and Communications Review, 2001, 5(1): 3-55.
- [25] 陶维青, 夏熠, 陆鼎堃. S 变换熵理论及其在电力系统故障检测中的应用研究 [J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2016, 39(1): 40-45.
- TAO Weiqing, XIA Yi, LU Dingkun. Study of S-transform entropy theory and its application in fault detection of electric power system [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2016, 39(1): 40-45.

(编辑 武红江 亢列梅)