

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181443

# 基于小波变换和 WVD 分布的电子式互感器 突变性故障协同诊断方法

刘尧, 韩伟, 刘芳冰, 李琼林, 周宁

(国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450052)

**摘要:** 针对现有互感器故障诊断方法中突变性故障和系统异常干扰信号同时发生时缺乏应对方案的问题, 提出了一种基于小波变换和 WVD 分布的互感器突变性故障协同诊断方法。借鉴站域思想, 对变电站中的互感器划分协同甄别组, 利用小波变换模极大值原理定位信号突变时刻。在有多个互感器因系统扰动出现干扰信号的情况下, 依然能够利用 WVD 分布的良好时频分布特性将故障互感器从中辨识出来。在 PSCAD 中搭建仿真模型, 验证了所提方法在突变性故障与系统扰动同时/不同时发生时均能够对故障互感器有效辨识。

**关键词:** 电子式互感器; 小波变换; WVD 分布; 协同诊断

## A collaborative diagnosis of abrupt-changing fault of electronic instrument transformer based on wavelet transform and WVD

LIU Yao, HAN Wei, LIU Fangbing, LI Qionglin, ZHOU Ning

(Electric Power Research Institute of State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China)

**Abstract:** In view of the lack of a solution to deal with abrupt-changing fault and abnormal disturbance signals in the existing transformer fault diagnosis methods, this paper presents a collaborative diagnosis of abrupt-changing fault of electronic instrument transformer based on wavelet transform and WVD. Based on the idea of station-area, the instrument transformers in substations are divided into cooperative discriminate groups, and the principle of wavelet transform modulus maxima is used to locate the sudden change time of signals. In the case of multiple transformers disturbing signal due to system disturbance, the fault transformer can still be identified by the good time-frequency distribution characteristics of WVD distribution. A simulation model is built in PSCAD to verify the effectiveness of the proposed method in identifying fault transformers when abrupt-changing fault and system disturbance occur simultaneously or at different times.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51207050).

**Key words:** electronic instrument transformer; wavelet transform; WVD distribution; collaborative diagnosis

## 0 引言

电子式互感器准确采集电气量信息是数字化/智能化变电站功能实现的重要基础, 然而考虑到其在制造结构中使用光学和电子器件, 长期暴露在电磁干扰和极端恶劣气候的环境中, 存在较高的故障隐患。互感器故障造成采集到的数据无法准确反映电气量信息, 将会影响变电站内二次系统的正常运行和功能实现, 严重者甚至威胁到整个电网的安全

稳定<sup>[1-3]</sup>。

为解决上述问题, 除了可改进互感器制造工艺、改善工作环境外, 最为有效的便是研究开发故障诊断技术<sup>[4-7]</sup>。现有技术方法主要有基于解析数学模型的故障诊断方法<sup>[8-11]</sup>, 基于知识的故障诊断方法<sup>[12]</sup>和基于信号处理的故障诊断方法<sup>[13-16]</sup>。其中, 基于解析数学模型的方法通过建立对应模型来提取分量进行比对, 可对故障源进行精准定位。然而模型建立的准确与否直接影响本类方法的使用, 鲁棒性低。基于知识的故障诊断方法以知识处理技术为基础, 集合了辩证和数理逻辑的方法, 其摆脱了依赖单一

数学模型的缺点,适用于非线性系统。但是这类方法依赖经验数据的积累,甄别实时性不高,适用范围窄,实现难度高。基于信号的故障诊断方法则利用信号分析理论对采集信号的时频特征进行分解,以此实现故障互感器的诊断。其中小波变化理论发展最为成熟,它利用尺度-时间分析方法,能够多分辨率综合分析信号的时频特性,对于原始信号、干扰信号和突变信号都有较好的辨识度。文献[14]通过分析一次系统电气量变化特点,利用小波变换多尺度模极大值原理定位信号突变时刻,将多个互感器的突变时刻对比以此进行诊断。文献[15]对有源式电子互感器的故障类型进行分类,通过分段函数模拟不同故障类型,并将小波变换的理论 with 神经网络故障分析方法相结合,提出了新型的故障检测方法。文献[16]更系统地将整站思想引入,采用逻辑变量的方法对小波变换后的异常信号进行分析,提出另一种基于站间信息的互感器故障协同诊断及判据。文献[17]将大数据处理技术引入数字电能计量系统误差的评估,提出了基于多参量退化模型的误差评估方法,该方法能有效地动态评估数字化计量系统误差,精度较高。

互感器故障诊断虽已取得累累硕果,但上述研究或忽略或通过假设避开一个问题:互感器故障信号与系统异常干扰信号同时出现。系统异常干扰信号主要是由于大量负荷切除、发电厂接入、系统发生故障而使得系统内部信号存在明显振荡,这种信号与互感器突变性故障信号在时频特性上较为相似,使得二者同时发生时对故障互感器的诊断尚无解决方法。虽然文献[16]引入站间信息的方法能够为解决上述共性故障提供参考,但是考虑到系统异常干扰信号众多,单一依靠逻辑变量的组合结果来判断会出现适应性不足的问题。本文引入维格纳威耳分布(WVD)<sup>[18-19]</sup>,利用其能够准确描述信号随频率和时间的变化特性,将其与小波变换结合,从站域角度提出了一种新的互感器突变性故障协同诊断方法。

### 1 互感器异常信号甄别原理

诊断电子式互感器故障的关键是辨识互感器本身故障和一次系统信号异常这两种状态。由于来自一次系统的故障和扰动会使得系统内多个互感器同时发生信号突变的情况,因此可以通过检测比较同一时刻是否仅有单一互感器信号突变进行诊断。

#### 1.1 基于小波算法的信号奇异值检测原理

异常信号的突变通常关于突变中心点呈现局部奇对称或局部偶对称特点,选择另一局部奇或局部

偶特性的窗函数与其进行卷积,可得如表 1 所示的卷积结果。

表 1 信号卷积结果

Table 1 Results of signal convolution

突变信号	卷积结果	
	选择奇函数	选择偶函数
局部奇	局部奇	局部奇
局部偶	局部奇	局部偶

在与给定信号进行卷积后,可以得到局部奇或局部偶特性的结果,使得突变点对应变换结果中的极大值点或过零点,设如式(1)的函数。

$$\begin{cases} \omega(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} \\ \psi^{(1)}(t) = \frac{d\omega}{dt} \\ \psi^{(2)}(t) = \frac{d^2\omega}{dt^2} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\omega(t)$  为光滑函数,其与信号卷积可使信号平滑;  $\psi^{(1)}(t)$ 、 $\psi^{(2)}(t)$  分别为选择的  $\omega(t)$  一阶、二阶导函数,各自具备局部奇对称和偶对称特性,它们与信号卷积的结果可以表现出信号突变特征(各自对应极大值点和过零点),如图 1 所示。

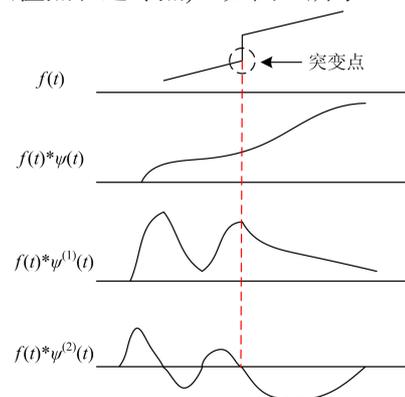


图 1 突变函数卷积结果

Fig. 1 Convolution result of catastrophe function

因为信号突变点包含高频成分,缓变部分包含低频成分,选取不同的小波变换尺度,可以使不同的频率成分具有不同的权重,从而利用模极大值检测出信号的奇异点。实际应用中,采用一阶导数  $\psi^{(1)}(t)$  作为小波变换基函数,具有一阶消失矩,能够突出和精确地显示出信号发生突变的时刻。

#### 1.2 基于改进 WVD 分布的多分量信号时频分析原理

运用小波变换算法固然可以在仅互感器发生故障时将其诊断出来,但是这种方法的实现有一定的前提条件:系统故障或者扰动的异常状态与互感器

自身的故障不同时发生。当二者同时发生时,非故障互感器也会出现信号突变造成难以准确诊断。对此本文引入 WVD 时频分布,如式(2)所示。

$$\text{WVD}(t, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} x^*(t - \frac{1}{2}\tau)x(t + \frac{1}{2}\tau)e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (2)$$

分析单分量信号时, WVD 具有分布良好的集中性,且频率分辨率极高。考虑到故障信号一般为多分量,而 WVD 分布不具备可加性,处理非线性多分量故障信号时,其分布存在交叉干扰项。设故障信号为  $x(t) = x_1(t) + x_2(t)$ , 将其代入式(2)可得

$$\text{WVD}_x(t, \omega) = \text{WVD}_{x_1}(t, \omega) + \text{WVD}_{x_2}(t, \omega) + \text{WVD}_{x_1, x_2}(t, \omega) + \text{WVD}_{x_2, x_1}(t, \omega) \quad (3)$$

干扰项主要来源于全局信号之间的相互影响,由于干扰项的出现,在对电子式互感器的输出信号进行综合对比分析时,很难辨识干扰项和真实成分。对此,本文进行相应改进,对 WVD 的时间和频率两个方向加窗:

$$\text{SPW}_x(t, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau)g(s-t)x^*(s - \frac{1}{2}\tau)x \cdot (s + \frac{1}{2}\tau)e^{-j\omega\tau} ds d\tau \quad (4)$$

SPW 为伪平滑的 WVD 分布,该分布可以同时抑制时间轴和频率轴方向的交叉项,对于复杂故障信号具有良好的时频分析性能。利用此时频特性,能够将频率差异较大的信号区分,以应对互感器故障和系统干扰同时发生时信号难以辨识的问题。

## 2 协同诊断方案设计

当电力系统发生短路故障、大量负荷切入或者发电厂接入时,系统内部异常信号会使互感器采集到的信号发生明显同步振荡,此时若想单一互感器利用自身输出信号的时频分析来甄别是否发生故障可行性较低。然而考虑到在一个变电站中,所有互感器都接入同一系统,当互感器处于正常状态时,它们之间采集的信号数据必然在信号时频特性上具有某种协同性。基于变电站站域信息共享<sup>[20-22]</sup>、网络化交互的特点,可以对不同互感器进行协同甄别组划分,将其采集信号进行综合对比分析,以协同性作为参考,实现异常互感器的快速甄别。

### 2.1 站内协同甄别组划分

协同甄别互感器组的划分标准如下:

1) 互感器组中的成员之间的物理距离和逻辑距离足够近,这样可以保证不同成员采集信号的协同性足够明显。

2) 互感器组中的成员数量必须大于 3 个。本文是在假设只有少数互感器出现异常的情况下提出的

甄别算法,所以只有在成员数量足够多的情况下,才能以协同性作为参考标准。

以图 2 所示的典型 220 kV 变电站为例,说明协同甄别组的划分。

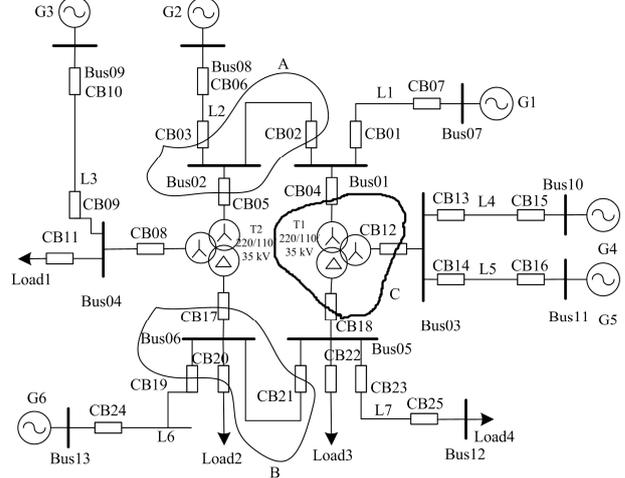


图 2 典型 220 kV 变电站拓扑连接

Fig. 2 Diagram of topology connection for typical 220 kV substations

对于互感器甄别组的划分,通常优先考虑站内同一台变压器、变压器侧与其对应出线侧的多互感器组成甄别组,若出线较少则可考虑按同一电压等级线上的互感器或者出线功率流向同一地区互感器组成甄别组。按照甄别组的选取原则, A、B、C 3 个割集所包含的互感器可以组成 3 个相应的互感器甄别组。A 组互感器成员为 CB02、CB03、CB05, B 组互感器成员为 CB17、CB19、CB20、CB21, C 组互感器成员为 CB04、CB12、CB18。这种分组保证各互感器成员物理距离相邻,采集信号协同性足够明显;同时成员数量大于 3,这样使得在只有少数互感器发生异常的假设下,以协同性作为甄别的标准具有可行性。

类似地,对于变电站中其他每一个互感器,按照同样的标准,可以为其指定一个最优互感器甄别组,并把这种分组存储在上位控制机中。在变电站合并单元中直接利用该分组信息可以实现每个互感器的甄别判断。

### 2.2 基于站域信息共享的互感器故障协同诊断方法

综合互感器的两种异常信号甄别原理和协同甄别组的划分标准,本文提出了一种新的互感器故障协同诊断方法,诊断流程如图 3 所示。采用小波奇异值检测原理对变电站已经划分甄别组内的互感器输出信号进行突变时刻检测,以此作为判定是否有互感器故障发生的先决条件。在进行小波算法奇异

值判别时, 需将电气量小波变换后的幅值与门槛值  $V_{set}$  比较, 该门槛值取决于电网正常运行下互感器输出数据因随机误差而波动的小波变换模极大值。

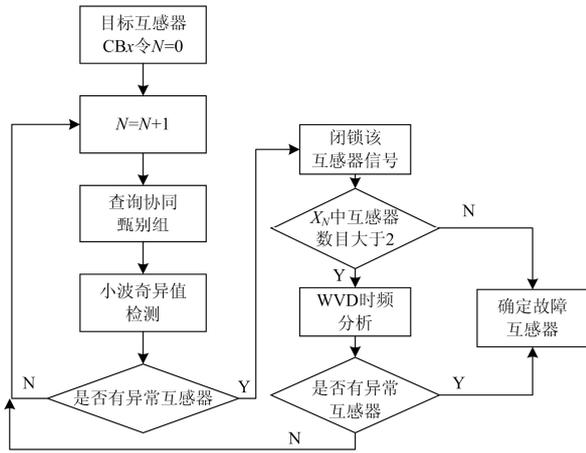


图 3 故障互感器诊断流程图

Fig. 3 Flow chart of fault transformer diagnostic

在检测到互感器异常信号时, 利用改进 WVD 分布的时频分析方法对两种情况(仅发生单一互感器故障和互感器故障与系统干扰异常同时发生)进行具体辨识。考虑到信号随时间变化的特性, 当检测出信号异常互感器时, 其输出信号将被闭锁, 不会上传。同时将待判别协同甄别组  $X_N$  转移为协同甄别组  $X_{N+1}$ , 重复该甄别流程。如果在该过程中, 并未检测到异常互感器, 则回到初始状态, 继续运行该甄别方案。

### 2.3 不同故障场景下的互感器故障甄别分析

#### 1) 互感器故障与系统异常干扰不同时发生

设定互感器输出信号  $y_i = y_s + s_i + x_i$ , 其中,  $y_s$  为系统输出分量、 $s_i$  为系统偏差分量、 $x_i$  为互感器故障分量。当系统稳定运行时,  $y_s = A \sin(\omega t + \varphi)$  为缓变信号,  $s_i$  属于原理性偏差分量, 同样是缓变信号; 当电力系统中出现较大振荡时, 比如大量负荷的突然切除、大容量电场的突然接入、系统发生短路故障等,  $y_s$  将发生突变。

假设在  $t_1$  时刻互感器 CB20 发生故障,  $t_2$  时刻系统信号异常。如果  $t_1$  与  $t_2$  之间相差足够大, 在包含  $t_1$  一个采样区间的时间内系统信号正常, 通过小波变换对 CB17、CB19、CB20、CB21 采集的信号进行小波算法奇异值检测, 只有 CB20 因为自身发生故障,  $x_i \neq 0$ , 使得输出信号中有明显的突变点, 其突变中心时刻就是  $t_1$ ; 对于 CB17、CB19、CB21, 在包含  $t_1$  的采样区间内系统并没有发生大幅振荡,  $y_s + s_i$  为缓变信号, 同时, 互感器自身正常,  $x_i = 0$ , 所以他们的输出信号平滑变化, 经过小波算法奇异

值检测并不能检测到突变点。可以得出有突变点的 CB20 为故障互感器。

如果  $t_1$  与  $t_2$  处于同一个采样区间之内, 同理, CB20 检测到的奇异时刻为  $t_1$ 、 $t_2$ , 而 CB17、CB19、CB21 因为系统信号  $y_s + s_i$  在  $t_2$  时刻有较大的振荡而使得检测到的奇异时刻仅有  $t_2$ 。可以得到在  $t_1$  时刻发生突变的 CB20 为故障互感器。

综上, 当系统大幅振荡与互感器故障不同时发生时, 只需要使用小波算法对协同甄别组中的互感器做奇异值检测, 综合对比各互感器成员之间信号发生突变的时刻, 如果某一时刻仅少数互感器信号发生突变, 即为故障互感器。

#### 2) 互感器故障与系统异常干扰同时发生

当互感器故障与系统异常干扰同时发生时, 协同甄别组 B 内的互感器利用小波算法转化时均会在  $t_1$  时刻出现奇异值。此时即需要通过改进的 WVD 时频分析方法提取不同互感器输出信号中的频率成分, 再对各个互感器成员的 WVD 分布进行综合对比来完成故障互感器的识别。

对于故障互感器 CB20, 在  $t_1$  时刻, 其输出信号包含系统信号  $y_s + s_i$ , 对应频率  $\omega_s$ ; CB20 的输出信号还包括自身故障分量  $x_i$ , 在互感器发生突变故障时  $x_i$  为高频分量, 对应频率为  $\omega_x$ 。由于互感器与电网是完全不同的两个系统, 两个系统突变时所引起信号的频率具有足够的差异性(本文假设  $\omega_s \neq \omega_x$  且有足够的区分度), 所以在  $t_1$  时刻 CB20 故障信号的 WVD 分布中, 除了包含频率为  $\omega_s$  的分量外, 还包含频率为  $\omega_x$  的分量。对于互感器 CB17、CB19、CB21, 在  $t_1$  时刻, 自身并没有发生故障,  $x_i = 0$ , 它们的 WVD 分布中仅含  $\omega_s$ , 因此 WVD 分布中包含频率分量多的 CB20 就是故障互感器。

综上, 当系统异常与互感器故障同时发生时, 对协同甄别组中的所有互感器输出信号进行 WVD 变换, 对比各个互感器的 WVD 分布, 如果某一互感器的 WVD 分布包含的高频成分与其他互感器具有明显差异, 即可确定为故障互感器。

## 3 仿真实验

将图 2 所示的变电站拓扑在 PSCAD/EMTDC 中搭建如图 4 所示的典型 220 kV 变电站模型, 变电站中、低压侧使用恒功率的负荷模型, 输电线路采用 Jmarti 依频模型模拟, 变压器额定容量为 100 MV·A, 额定电压为 220/110/35 kV, 铁芯饱和特性膝点电压为 1.3 倍额定电压。仿真时长 0.5 s, 步长 0.05 ms。

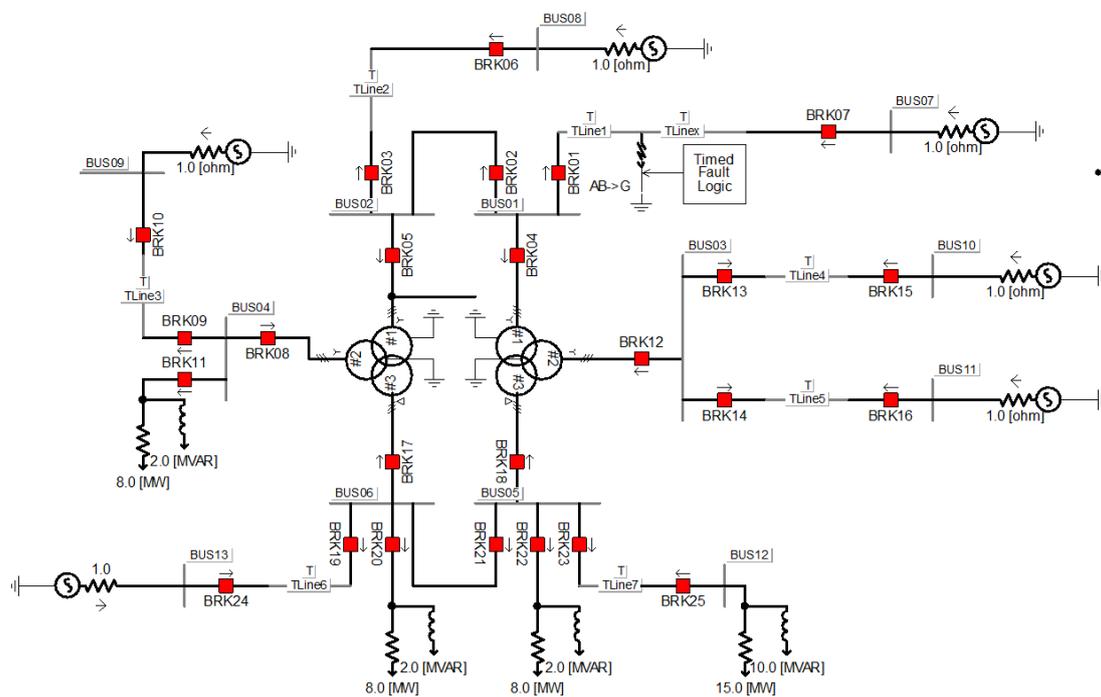


图 4 PSCAD 仿真模型

Fig. 4 PSCAD simulation model

算例 1: 仅互感器发生故障

设置互感器 CB20 在  $t=0.2$  s 时发生故障, 系统在整个采样过程中保持稳定。协同甄别组 B 组内各个互感器采集到的电流信号波形如图 5 所示, 对电流信号进行小波变换奇异点检测结果如图 6 所示。

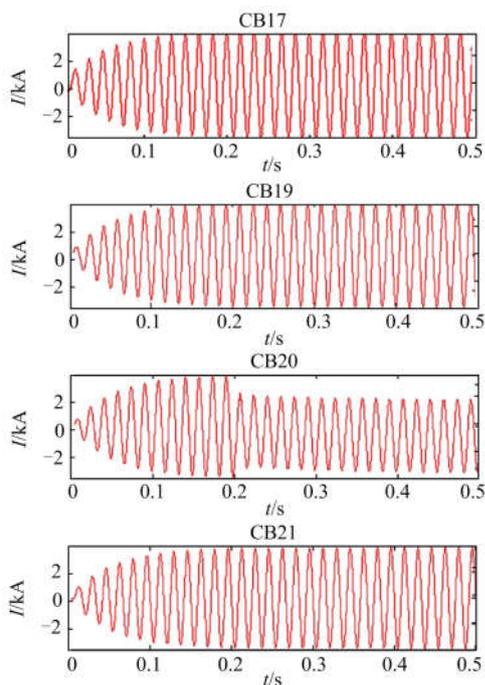


图 5 故障场景下的互感器波形

Fig. 5 Transformer waveform in fault scenario

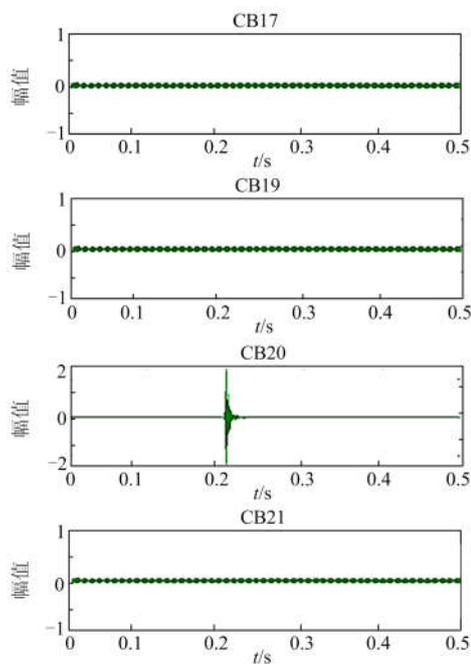


图 6 故障场景下的互感器信号小波变换

Fig. 6 Wavelet transform of transformer in fault scenario

从图 6 中可以看到仅互感器 CB20 在  $t=0.2$  s 时存在畸变时刻, 其他互感器没有畸变点, 从而得出异常互感器是 CB20。由于判断结果只有一个异常互感器, 本组甄别结束。

算例 2: 互感器故障和系统干扰不同时发生

仍以协同甄别组 B 为例，设置  $t=0.2\text{ s}$  时系统发生异常振荡，同一个采样区间内  $t=0.212\text{ s}$  时 CB20 互感器发生故障，此时甄别组 B 中各互感器波形及小波变换奇异点检测结果采集信号如图 7 和图 8 所示。

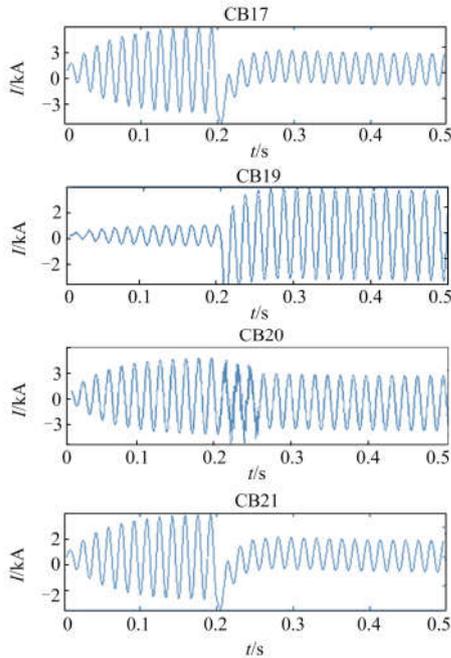


图 7 故障与系统扰动不同时发生时互感器波形  
Fig. 7 Transformer waveform when faults and system disturbances occur at different times

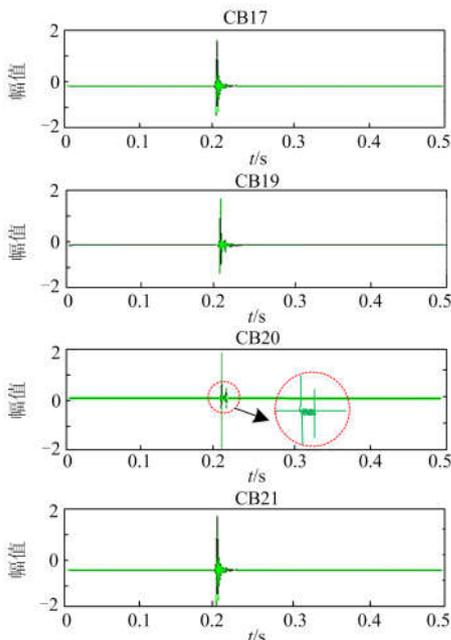


图 8 故障与系统扰动不同时发生时互感器信号小波变换  
Fig. 8 Wavelet transform of transformer when faults and system disturbances occur at different times

可以看到协同甄别组 B 内所有互感器在  $t=0.2\text{ s}$  时都产生了奇异点。其中互感器 CB20 在  $t=0.212\text{ s}$  时还具有一个奇异点，显然互感器 CB20 波形与其他互感器不协同，所以互感器 CB20 是故障互感器。

算例 3: 互感器故障与系统异常干扰同时发生

仍以协同甄别组 B 为例，设置  $t=0.2\text{ s}$  时互感器故障和系统故障干扰同时发生，甄别组 B 内各互感器波形结果如图 9 所示。当互感器故障和系统异常干扰同时发生时，甄别组内互感器均会出现一个奇异信号，此时仅依靠小波奇异值检测无法辨识故障互感器，各互感器均被判别为异常互感器。此时由于组内互感器数目大于 2，继续进行 WVD 时频分析，结果如图 10 所示。

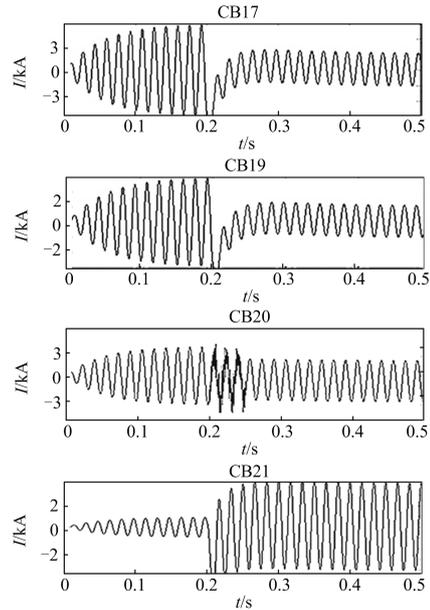


图 9 故障与系统扰动同时发生时互感器波形  
Fig. 9 Transformer waveform under simultaneous occurrence of faults and system disturbances

从图中可以看到，互感器 CB17、CB19、CB21 在整个时段内的频率分量都是相似的，只有互感器 CB20 在  $t=0.2\text{ s}$  时，在 500 Hz 频率以上还存在组内其他互感器所不具备的频率分量，于是得出互感器 CB20 是故障互感器。由于现场实际解析出的频率可能更为复杂，在利用 WVD 分布比对各互感器频率时，也可考虑设置一定的频率差门槛(如 5 倍以上频率差)。

事实上，本文所提方法的故障识别准确率取决于小波变换的门槛值(根据电网正常运行下互感器输出数据因随机误差而波动的小波变换模极大值)以及改进 WVD 分布的时频分辨率等诸多因素，其能够对仅利用单一小波变换原理进行互感器故障诊断的方法进行有效补充。

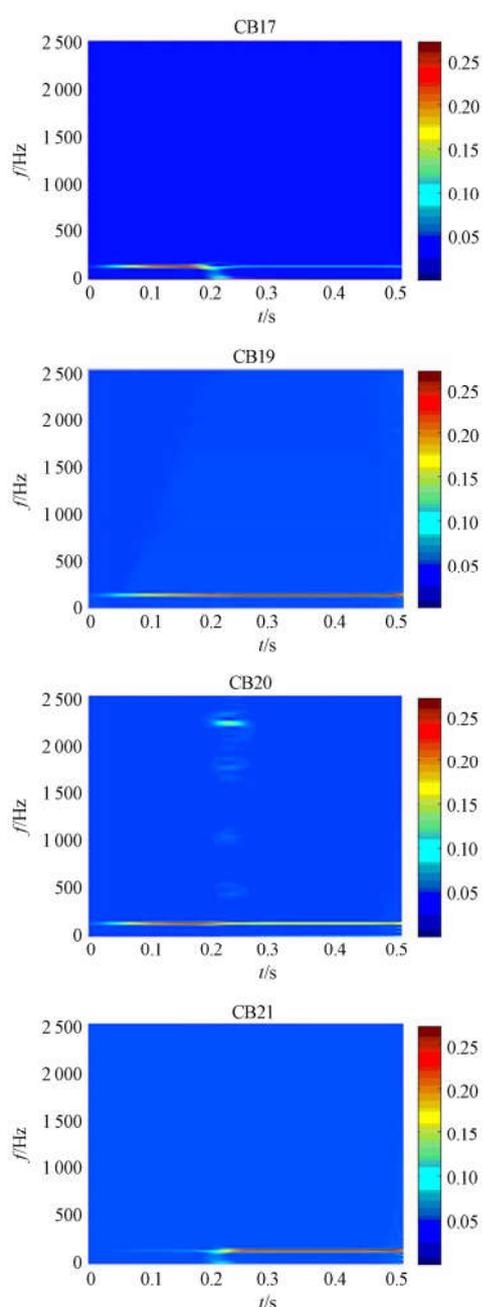


图 10 故障与系统扰动同时发生时互感器信号 WVD 结果

Fig. 10 WVD results of transformer under simultaneous occurrence of faults and system disturbances

#### 4 结论

随着智能变电站的不断推广, 电子式互感器由于长期处于复杂的电磁环境中, 会发生故障, 导致运行挂网运行不长。本文针对电子式互感器发生的突变性故障, 提出了一种基于小波变换和 WVD 分布的协同诊断方法。通过引入变电站内协同甄别互感器组的信号作为对比信号, 利用小波奇异值检测

原理和改进的 WVD 时频分析方法, 能够将故障互感器从协同甄别组中辨识出来。本文所提策略不但能够在仅发生互感器突变性故障时有效诊断, 而且在互感器故障与系统异常干扰同时/不同时发生场景下均能有效应对。

#### 参考文献

- [1] 黄乐, 陈亦平, 舒双焰. 电流互感器故障所致电网事故及其处置的分析[J]. 南方电网技术, 2011, 5(4): 68-70.  
HUANG Le, CHEN Yiping, SHU Shuangyan. Analysis on the power grid accident caused by current transformer failures and its handling[J]. Southern Power System Technology, 2011, 5(4): 68-70.
- [2] 晏年平, 张宇, 邹晓兵. 雷电诱发 500 kV 变电站 5 台电流互感器故障分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1558-1565.  
YAN Nianping, ZHANG Yu, ZOU Xiaobing. Analysis of lightning exciting failure of five current transformers in 500 kV substation[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5): 1558-1565.
- [3] 周雪青, 郝晓光, 张岩坡, 等. 基于分段拟合算法的电流互感器误差研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(3): 139-143.  
ZHOU Xueqing, HAO Xiaoguang, ZHANG Yanpo, et al. Research on the error of current transformer based on subsection fitting algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(3): 139-143.
- [4] ZHANG C, HE Y, JIANG S, et al. Transformer fault diagnosis method based on self-powered RFID sensor tag, DBN, and MKSVM[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(18): 8202-8214.
- [5] QIAN Suxiang, HU Hongsheng, CAO Jian, et al. Remote monitoring and fault diagnosis system for power transformer based on HMM[C] // 8th International Conference on Electronic Measurement and Instruments (ICEMI') August 16-18, 2007, Xi'an, China: 3571-3575.
- [6] 李朝阳, 杨健维, 王玘, 等. 基于主元分析的牵引变电所互感器二次量异常故障在线识别方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(8): 103-109.  
LI Zhaoyang, YANG Jianwei, WANG Qi, et al. Online identification of secondary measurement abnormality based on PCA for instrument transformers of traction substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(8): 103-109.
- [7] 陈敦辉, 苏舒, 林湘宁, 等. 基于历史数据纵向协同性的电子式互感器伴随故障甄别策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(23): 115-126.

- CHEN Dunhui, SU Shu, LIN Xiangning, et al. The identification strategy of transformer synchronous fault based on synergy of historical data[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(23): 115-126.
- [8] LAURENSSE I J, KOREMAN C G A, RYTGERS W R, et al. Applications for optical current and voltage sensors[J]. Sensors and Actuators, 1989, 17(1): 181-186.
- [9] SASANO. Laser CT and laser PD for EHV power transmission lines[J]. Electrical Engineering in Japan, 2010, 93(5): 91-98.
- [10] LAURENSSE I J, KOREMAN C G A, RUTGERS W R, et al. Applications for optical current and voltage sensors[J]. Sensors & Actuators, 1989, 17(1): 181-186.
- [11] 冯建勤, 王庆铭, 丁莉芬, 等. 电子式电压互感器的研究现状和展望[J]. 变压器, 2010, 47(11): 44-47.  
FENG Jianqin, WANG Qingming, DING Lifen, et al. Present research situation and trend if electronic voltage transformer[J]. Transformer, 2010, 47(11): 44-47.
- [12] FRANK P M. Analytical and qualitative model-based fault diagnosis—a survey and some new results[J]. European Journal of Control, 1996, 2(1): 6-28.
- [13] 李开成, 叶妙元. 从电磁式电压互感器到光学式光纤电压互感器[J]. 变压器, 1995, 32(11): 6-8.  
LI Kaicheng, YE Miaoyuan. From electromagnetic voltage transformer to fiber-optic voltage transformer[J]. Transformer, 1995, 32(11): 6-8.
- [14] 熊小伏, 何宁, 于军, 等. 基于小波变换的数字化变电站电子式互感器突变性故障诊断方法[J]. 电网技术, 2010, 7(7): 181-185.  
XIONG Xiaofu, HE Ning, YU Jun, et al. Diagnosis of abrupt-changing fault of electronic instrument transformer in digital substation based on wavelet transform[J]. Power System Technology, 2010, 7(7): 181-185.
- [15] 王涛, 张宁, 刘琳, 等. 有源电子式互感器故障诊断技术的研究与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(18): 74-79.  
WANG Tao, ZHANG Ning, LIU Lin, et al. Research and application of electronic transformer fault diagnosis[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(18): 74-79.
- [16] 熊小伏, 杨雪东, 刘年. 基于站间信息的电子式互感器故障协同诊断方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(21): 80-83.  
XIONG Xiaofu, YANG Xuedong, LIU Nian. A collaborative diagnosis method of electronic transformer fault based on the inter-substation information[J]. Power System Technology, 2012, 40(21): 80-83.
- [17] 张秋雁, 程含渺, 李红斌, 等. 数字电能计量系统误差多参量退化评估模型及方法[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3202-3207.  
ZHANG Qiuyan, CHENG Hanmiao, LI Hongbin, et al. Multi-parameter degradation model and error evaluation method for digital electrical power metering system[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3202-3207.
- [18] 刘洋, 曹云东, 侯春光. 基于经验模态分解及维格纳威尔分布的电缆双端故障定位算法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4086-4093.  
LIU Yang, CAO Yundong, HOU Chunguang. The cable two-terminal fault location algorithm based on EMD and WVD[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4086-4093.
- [19] 李秀坤, 吴玉双. 多分量线性调频信号的 Wigner-Ville 分布交叉项去除[J]. 电子学报, 2017, 45(2): 315-320.  
LI Xiukun, WU Yushuang. Cross-term removal of Wigner-Ville distribution for multi-component LFM signals[J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45(2): 315-320.
- [20] 蒋红亮, 吕飞鹏. 基于改进证据理论融合的站域后备保护算法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(12): 57-63.  
JIANG Hongliang, LÜ Feipeng. An algorithm of substation-area backup protection based on improved evidence theory fusion[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(12): 57-63.
- [21] 梁鑫钰, 李伟, 张哲, 等. 基于站域信息的备自投研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 50-56.  
LIANG Xinyu, LI Wei, ZHANG Zhe, et al. Automatic bus transfer based on substation area information[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 50-56.
- [22] YIN X, ZHANG Z, LI Z, et al. The research and the development of the wide area relaying protection based on fault element identification[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 95-107. DOI: 10.1186/s41601-016-0023-z.

收稿日期: 2018-11-19; 修回日期: 2019-02-01

作者简介:

刘尧(1992—), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: 540327446@qq.com

韩伟(1975—), 男, 本科, 教授级高级工程师, 主要研究方向为继电保护及自动化技术, 智能电网技术。

(编辑 周金梅)