

# 利用改进递归小波变换区分电力系统振荡与故障

董杰,张举,王增平,焦彦军,郝琳娜

(华北电力大学电力系,河北保定 071003)

**摘要:**分析了母小波的选取问题,强调了相频特性的重要性。以此为基础,选用一种复小波为母小波,并利用快速递推算法进行计算。为了获得最佳小波变换效果,分析了利用改进递归小波变换区分振荡与故障的原理,并首次提出了一种新判据。新判据充分利用了小波变换的结果,可从中提取更全面、更充分的故障信息来区分故障与短路。经仿真试验证明,此新判据不受振荡周期大小和故障类型的影响,可无延时地即时区分出故障与振荡,其效果优于简单判据 WIM。提出的方法具有算法简单,检测准确,抗干扰能力强,不会发生误判的优点,具有较好的应用前景。

**关键词:**小波变换; 振荡; 故障; 判据

中图分类号: TM711

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2002)04-0015-04

## 1 引言

如何区分电力系统振荡与短路,一直是距离保护的重要课题之一。传统距离保护的振荡闭锁广泛采用出现负序电流突变量时短时开放距离保护的、段,然后对其闭锁的方法。其弊病是,在保护闭锁期间若发生区内、段范围内的故障,保护只能以长延时的三段来跳闸。

LFP-900 系列微机保护中对此进行了改进,在振荡闭锁回路中增加了振荡中不对称故障开放元件和对称故障开放元件。但在振荡中发生严重的三相短路时,只能延时 300ms 切除故障<sup>[1]</sup>。WXB-11 型微机线路保护装置用来检出振荡中又故障的方法是在振荡过程中按感受阻抗先有突变而后持续 0.2s 不变原理来检出振荡中又发生了短路故障。但当 在 180 附近发生故障时,该方法无法检出故障。德国西门子公司生产的 7SL32 型快速距离保护装置中使用可识别系统振荡的 7IL16 测量元件和 7TW12 逻辑元件组成振荡闭锁回路。其原理是根据电气量的变化速度来区分振荡与短路,在一定程度上要受振荡周期大小、负荷轻重和线路长短的影响。总之,上述几种改进措施虽然在不同程度上改善了距离保护在振荡中的性能,但仍不尽完善。

小波变换是近年来获得广泛应用的一种信号处理方法,具有时频局部化性能,能把分析对象“聚焦”到任意细节,被誉为数学上的“显微镜”。小波尤其是复小波对信号的奇异性和突变部分非常敏感,而电力系统故障通常表现为电压、电流信号的某种突变,因此,利用小波变换来检测突变点的位置和突变的时刻是很有效的。文献[2]采用 Daubechies 5 阶小

波分析电力系统的振荡和故障。Daubechies 5 小波是正交紧支小波,具有计算量小、使用方便等优点,对幅值突变效果很好。文献[3]采用改进递归小波变换分析振荡与故障。本文将在其基础上,进一步讨论如何利用小波变换结果来获得最佳分析效果,然后推导出区分振荡与故障的新判据,并通过仿真试验来验证。

## 2 母小波的选取

一般而言,只要满足容许性条件的函数就可做母小波。母小波经尺度伸缩和位置平移,得到一系列与母小波形状十分相似的小波。小波变换实质上就是测量被分析信号与这一系列小波的“相似性”。因此,选用不同的母小波来分析同一信号,其结果可能大不一样。为了取得最佳的小波分析效果,针对具体应用领域来选择合适的母小波是非常重要的。

### 2.1 母小波的选取

#### (1) 相频特性的重要性

一般认为,小波分析结果在小波变换域的能量越集中,小波分析的效果就越好<sup>[4]</sup>。在小波理论中,常用时窗宽度  $t$  与频窗宽度  $\omega$  来分别评价信号的能量在时域和频域的集中程度<sup>[5]</sup>:

$$t^2 = \frac{1}{E} \int_{-\infty}^{\infty} t^2 |y(t)|^2 dt \quad (1)$$

$$\omega^2 = \frac{1}{2E} \int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 |Y(\omega)|^2 d\omega \quad (2)$$

式中  $E$  为  $y(t)$  的总能量:

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |y(t)|^2 dt = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} |Y(\omega)|^2 d\omega \quad (3)$$

可以证明:

$$2 E t^2 = \left| \left( \frac{d(\cdot)}{d} \right)^2 + 2(\cdot) \left( \frac{d(\cdot)}{d} \right)^2 \right| d \quad (4)$$

$$2 E t^2 = 2 / (\cdot) / 2d \quad (5)$$

这说明,信号能量在时域的集中程度既与它的幅频特性有关,又与它的相频特性有关。

小波的相频特性不仅可改变小波变换域的能量集中程度,还可改变小波提取信号中具有不同特点的信息的能力。因为信号携带的不同特点的信息,对应着信号中具有不同形状的波形分量。相频特性影响小波的波形与小波的时窗宽度,因而影响小波对特定信息所对应的特定波形分量与时窗宽度的匹配程度,从而影响小波提取这种特定信息的能力。因此,小波的相频特性对小波分析的结果有很大影响。

## (2) 母小波的选取

小波可分为实小波和复小波。实小波不能提取信号的相位信息,且相频特性类型少(如各种 D 小波全为最小相位型),不易与被分析信号匹配,致使应用场合受到限制。而复小波可供选择的相频特性相对较多,且能够提取信号的相位信息,因此易于与信号的相频特性相匹配。但目前大多数常用的复小波都为连续小波,如 Cauchy 小波, Besel 小波, Chirp 小波等,其相频特性特殊,计算复杂,且存在着连续小波使用不便的缺点。

本文采用一种快速衰减复函数做母小波<sup>[6]</sup>:

$$(t) = \left| -\frac{3t^3}{3} - \frac{4t^4}{6} - \frac{5t^5}{15} \right| e^{(+i\omega)t} u(-t) \quad (6)$$

这里引入了频移因子  $e^{i\omega t}$ , 以便获得更合适的相频特性。为使母小波满足容许性条件  $(0) = 0$ , 须使  $\omega = \sqrt{3}$ 。为了使  $1/a$  等于频率  $f$ , 可以令  $\omega = 2$ , 则  $\omega = 2/\sqrt{3}$ 。

将母小波进行伸缩、平移得:

$$b, a(t) = |a|^{-\frac{1}{2}} \left( \frac{t-b}{a} \right) \quad (7)$$

其中,  $a$  是与频率有关的伸缩参数,  $b$  是与时间有关的平移参数。

## 2.2 快速递推算法

设输入信号  $S(nT)$  的采样周期为  $T$ , 令平移参数  $b = kT$ , ( $k$  为整数)。则对信号的小波变换为:

$$w_s(kT, f) = \int_n s(nT) \sqrt{f} \overline{[f(nT - kT)] T} \quad (8)$$

其中,  $\overline{\quad}$  表示  $\quad$  的共轭复数。

式(8)的小波变换系数表示了在  $kT$  时刻对信号中频率为  $f$  的成分的刻画。也就是在位置  $b = kT$  处, 测量频率为  $f$  的成分其波形与此位置上对应的小波(从母小波经尺度伸缩和位置平移而得到)的相似程度。

为了满足实时性要求, 对式(8)施以  $Z$  变换, 并利用  $Z$  变换的位移性质, 得到快速递推算法<sup>[6]</sup>如下:

$$w_s(kT, T) = T \sqrt{f} [ {}_1s(k-1)T + {}_2s(k-2)T + {}_3s(k-3)T + {}_4s(k-4)T + {}_5s(k-5)T ] - {}_1w_s[(k-1)T, f] - {}_2w_s[(k-2)T, f] - {}_3w_s[(k-3)T, f] - {}_4w_s[(k-4)T, f] - {}_5w_s[(k-5)T, f] - {}_6w_s[(k-6)T, f] \quad (9)$$

此算法称为改进递归小波变换。由于它只采用历史的数据信息进行计算, 因此计算速度很快。在 DSP 芯片技术飞速发展的今天, 该算法完全可以实时运行。

## 3 区分振荡与故障的基本原理

虽然振荡与故障的电流波形都有很大的峰值, 但它们的电流信号中所含有的频率成分是不一样的。如果能选择适当的小波函数来对某种特定频率进行检测, 并分析小波变换在此频率上的不同表现, 就可以提取故障特征, 获得有效的判据。式(6)~(9)所描述的复小波及小波变换, 可以提取某一特定频率分量, 因此是比较理想的检测工具。本文的分析信号取为相电流, 特定频率取为  $f = 250\text{Hz}$ , 利用式(4)对各相电流信号进行小波变换。在正常运行时, 由于各相电流中主要成分是工频, 因而该频率成分很小。在系统振荡时, 由于系统振荡的原因是并列运行的系统或发电厂失去同步, 破坏了稳定运行, 因此可以视为一种拟稳态信号, 故该频率成分也很小。而当系统故障时会引发强烈的暂态过程, 会出现大量的高次谐波, 所以在故障相的相电流中, 该频率成分比起振荡时要大得多。因此, 可据此区分振荡与故障。

需要说明的是, 虽然上述的小波变换可以提取某一特定频率分量, 但它并不像傅立叶变换那样精确地定位在该频率上, 而只是在该频率的附近。另外, 它对频率成分的突然改变、幅值和相角的突变非常敏感。因此, 用它来区分振荡与故障是很有效的。

#### 4 建立判据

小波分析的效果不但与采用的小波母函数有关,还与采用的判据密切相关。要取得最佳的小波分析效果,必须找到适当的判据,以便提取最有效的信号特征。通常采用的判据主要有:小波变换的实部  $WTR$ 、虚部  $WTI$ , 幅度信息  $WTM = \sqrt{WTR^2 + WTI^2}$ , 相位信息  $WTPH = \arctan(WTI/WTR)$ , 等等。这些判据基本上是从某一侧面揭示信号特征,不够全面,因而在很多场合下应用效果不够很理想。

为充分利用小波变换结果来更全面地揭示信号特征,本文提出利用小波变换的复合信息作为判据,即:  $WTMPH3 = WTM \cdot WTPH^3$  (10)

#### 5 仿真试验及结果分析

本文根据式(9)及上述判据,对不同振荡周期的系统振荡、振荡中故障和振荡平息等情况,利用 MATLAB 语言编程进行了大量的仿真。仿真计算中的输入信号取自自动模试验数据。在仿真计算中,尺度  $a$  取为  $1/250$ , 输入信号采样频率为  $1000\text{Hz}$ 。仿真计算中同时给出了简单判据  $WTM$  的计算结果,以便对照比较。下面给出部分仿真结果。

##### 5.1 系统振荡时的小波变换

图1、图2为系统振荡波形与小波变换结果。

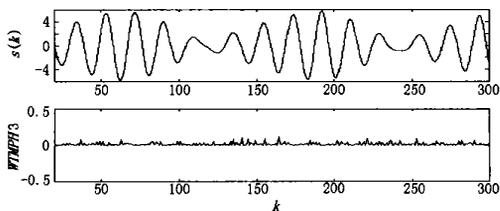


图1 振荡周期为0.1s

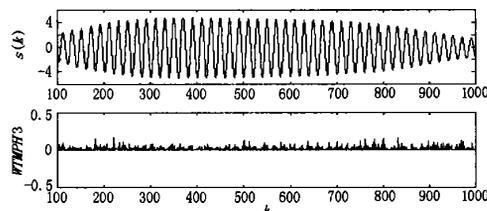


图2 振荡周期为1s

仿真试验表明,系统振荡时,在各种振荡周期下复合判据  $WTMPH3$  幅值均很小。

##### 5.2 系统振荡中又发生故障的小波变换

仿真试验表明,在振荡中发生各种故障时,  $WTMPH3$  幅值均很大,一般在  $1 \sim 5$  之间,足以区分

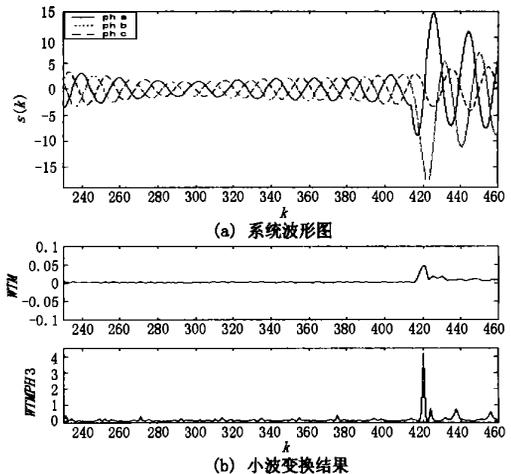


图3 振荡中发生 AB 两相接地短路

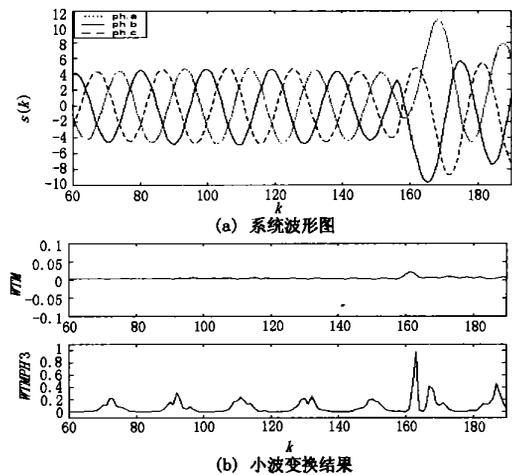


图4 振荡中发生 ABC 三相短路

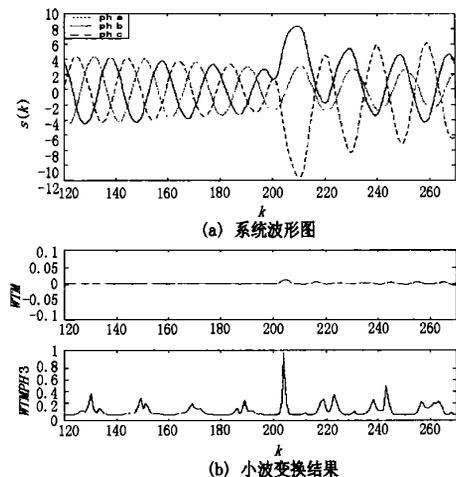


图5 振荡中发生 BC 两相短路

振荡与故障。相比之下,简单判据  $WTM$  幅值很小,一般小于  $0.1$ 。这个数量级的值太小,抗干扰能力不

足。因此,复合判据  $WTMPH3$  明显优于简单判据  $WIM$ 。

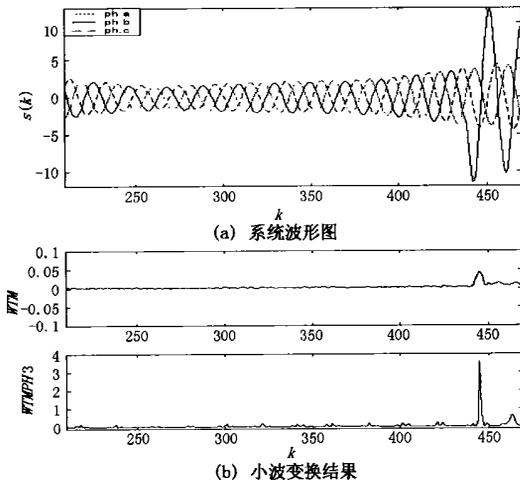


图6 振荡中发生B相接地短路

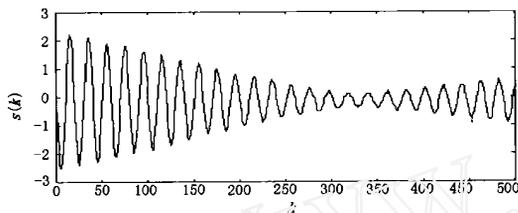


图7 振荡平息的波形

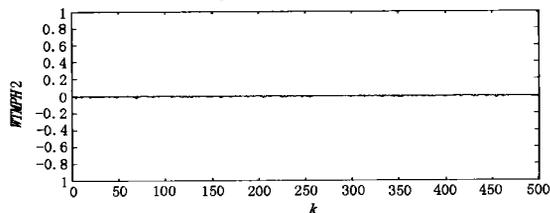


图8 小波变换结果

### 5.3 振荡平息的小波变换

从图7中可见,振荡平息过程中,复合判据  $WTMPH3$  的幅值很小,因此不会引起误判。

## 6 结语

本文分析了母小波的选取问题和利用小波变换区分振荡与故障的原理,强调了相频特性的重要性,并选用了改进递归小波变换。为充分利用小波变换结果来获得最佳小波变换效果,首次提出了一种新判据。经大量仿真试验证明,本文提出的新判据不受振荡周期大小和故障类型的影响,可无延时地即时区分出故障与振荡,其效果优于简单判据  $WIM$ 。本文提出的方法具有算法简单,检测准确,抗干扰能力强,不会发生误判的优点,可在距离保护的振荡闭锁模块中利用该判据,通过设置适当的门槛值即可有效地区分系统振荡与短路,从而改善距离保护在振荡中的性能,因此具有较好的实用前景。

### 参考文献:

- [1] 陈志梅. 系统振荡又发生短路故障时距离保护的动作为分析[J]. 电力学报, 1999, 14(1): 68-71.
- [2] 林湘宁, 刘沛, 程时杰. 电力系统振荡中轻微故障识别的小波算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(3): 39-44.
- [3] 陈皓. 小波变换原理识别电力系统故障及振荡中短路的研究[J]. 电力自动化设备, 2000, 20(5): 18-20.
- [4] Ramchandran K, et al. Wavelets, subband coding, and best bases[J]. Proceedings of IEEE, 1996, 84(4): 541-560.
- [5] 陈祥训. 正交紧支复小波的生成及其在电力系统中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(7): 83-88.
- [6] 张传利, 黄益庄, 马晓旭, 等. 改进递归小波变换在变压器保护中的应用研究[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(17): 20-22.

收稿日期: 2001-10-12; 修回日期: 2001-12-24

作者简介: 董杰(1962-),男,硕士研究生,研究方向为微机继电保护; 张举(1946-),男,教授,从事微机继电保护的教学与研究; 王增平(1964-),男,博士,副教授,从事微机继电保护的教学与研究。

## Distinguish fault from power swing based on improved recursive wavelet transform

DONG Jie, ZHANG Ju, WANG Zeng-ping, JIAO Yan-jun, HAO Lin-na

(North China Electric University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** The paper analyses the selection of mother wavelet and emphasizes the importance of phase spectrums. Based on that, the paper selects a complex wavelet as mother wavelet and uses fast recursive algorithm for calculation. To get the best effect of wavelet transform, the paper analyses the principles of discriminating power swing from fault, then presents a new criterion. The new criterion fully utilizes the results of wavelet transform and distills more comprehensive information from them to discriminate between power swing and fault. Simulation results prove that the criterion is not influenced by power swing period or fault type and can instantly distinguish power swing and fault. The effect of this criterion is better than that of simple criterion  $WIM$ . The method presented in the paper has many advantages such as simple algorithm, accurate discrimination results and strong immunity to disturbance.

**Key words:** wavelet transform; power swing; fault; criterion