

文章编号: 1000-582x(1999)04-0063-06

③ 63-68

小波变换在变压器绕组变形识别中的研究

TM410.32

陆治军¹, 孙才新², 陈伟根², 卢盛和¹, 杜林²

(1. 重庆市江北供电局 变电所, 重庆 401147; 2. 重庆大学 电气工程学院, 重庆 400044)

摘要: 论述变压器绕组变形检测的低压脉冲(LVI)法中利用小波变换提取特征量及变形识别的方法。通过实例证明, 利用小波变换能有效消除噪声, 使测量具有重复性, 并能进行变形的模式识别。

关键词: 低压脉冲法; 小波变换; 变形; 识别

中图分类号: TM 411

文献标识码: A

变压器 绕组

由于变压器绕组变形是变压器损坏的主要原因之一, 因此对绕组变形的检测也越来越引起人们的重视, 在目前最常用的检测方法中, 低压脉冲法(LVI)虽已被列入 IEC 及 IEEE 电力变压器短路试验导则和测试标准^[1], 但因为现场干扰使其测量重复性差, 以及对变压器绕组变形故障判断的灵敏度低, 给诊断带来了困难, 很难在生产实际中应用。小波变换最显著的特点是它同时具有时域局部化和频域局部化性质, 对不同的频率成分在时域上的取样步长是可调节的, 能将各种交织在一起的混合信号分解成不同频率成分的块信号^[2]。将小波变换用于 LVI 法中剔除干扰, 利用模极大值等作为故障特征量可解决测量结果的重复性问题, 并有可能从小波分解的结果中提取反映变压器绕组状态的特征量, 提高该方法对变压器绕组变形故障判断的灵敏度。

1 小波变换的离散化处理及算法

1.1 小波变换的离散化处理

小波是在窗口傅立叶变换的基础上发展起来的一种新的变换方法。在工程应用中, 需对小波变换进行离散化处理, 取尺度参数 $a = a_0^m$, 定位参数 $b = nb_0 a_0^m$, $a_0 > 1$, $b_0 \in \mathbb{R}$, 则有限能量信号或平方可积的信号 $f(t)$ 的离散小波变换^[3]

$$W_f(m, n) = a_0^{-\frac{m}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi(a_0^{-m} t - nb_0) dt \quad (1)$$

从(1)式可以看出, 小波变换对不同的频率成分(相应于 a_0^m) 在空间域上的采样步长(即 $b_0 a_0^m$) 是具有调节作用的。对信号进行小波分解, 实质上是对信号用不同的滤波器进行滤波, 这些滤波器的脉冲响应就是一系列的小波基。对应于不同的尺度因子 a 的小波基将信号

• 收稿日期: 1998-03-23

作者简介: 陆治军(1972-), 男, 四川遂宁人, 重庆大学硕士。从事在线监测与故障诊断研究。

分解到相应的频带,并且,尺度越小对应的频带的中心频率就越高。

若 $\Psi \in L^1 \cap L^2$ 且满足 $C_\Psi = \int_{\mathbb{R}} \frac{|\hat{\Psi}(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty$, 则允许小波 Ψ 一定是基小波。设窗口 Ψ 的中心与半径分别用 t^* 与 $\Delta\Psi$ 给出, 则函数 Ψ_{a,t^*} 是中心在 $b + at^*$ 、半径为 $a\Delta\Psi$ 的一个窗口函数。相应地, 假设 $\hat{\Psi}$ 的中心 $\omega^* > 0$, 则这个窗的中心频率为 $\frac{\omega^*}{a}$ 、带宽为 $\frac{\Delta\hat{\Psi}}{|a|}$, 即 $\Delta\Psi_{a,t^*} = |a| \Delta\Psi, \Delta\hat{\Psi} = \frac{1}{|a|} \Delta\hat{\Psi}$, 从而在相空间 $(t - \omega)$ 中有 Ψ_{a,t^*} 确定的窗面积与 Ψ 的相同, 但形状各异。由此我们得知信号 $f(t)$ 的小波变换的时间频率窗为 $[b + at^* - a\Delta\Psi, b + at^* + a\Delta\Psi] \times \left[\frac{\omega^*}{a} - \frac{\Delta\hat{\Psi}}{a}, \frac{\omega^*}{a} + \frac{\Delta\hat{\Psi}}{a} \right]$, 这个矩形窗的宽度由时间窗的宽度 $2a\Delta\Psi$ 决定, 这样它就表现出高频处的时间分辨率高, 即具有自动“变焦”的特性。

研究表明, 小波变换对信号奇异点非常敏感, 信号的奇异点的特性可用 Lipschitz 指数来描述^[2,3], 它与白噪声有着不同的 J 嗽特性。进而可以通过观察不同尺度上的小波变换模极大值的渐变规律、模极大值点的分布规律等实现去噪。

1.2 Mallat 算法中系数的选取

在小波变换的 Mallat 算法^[2,4] 中, 设 $\{V_l\}_{l \in \mathbb{Z}}$ 为给定的多分辨分析, φ, Ψ 分别是相应的尺度函数和小波函数, $f(t)$ 为 LVI 法测得的变压器绕组响应信号, 实际工程中假定 $f(t) \in V_0$, 则有

$$f(x) = A_0 f(x) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} C_k^0 \varphi_k^0 \quad \text{其中 } C_k^0 = \langle f, \varphi_{0,k} \rangle \quad (2)$$

注意到 $\langle \varphi_{0,k}, \varphi_1 \rangle = \bar{h}_{k-2m}, \langle \varphi_{0,k}, \Psi_{1-m} \rangle = \bar{g}_{k-2m}$, 于是有

$$f(x) = A_0 f(x) = A_1 f(x) + D_1 f(x) \quad (3)$$

其中

$$A_1 f(x) = \sum_{m \in \mathbb{Z}} C_{1,m} \varphi_{1,m}, D_1 f(x) = \sum_{m \in \mathbb{Z}} D_{1,m} \Psi_{1,m}$$

而

$$C_{1,m} = \sum_{k \in \mathbb{Z}} \bar{h}_{k-2m} C_{0,k}$$

$$D_{1,m} = \sum_{k \in \mathbb{Z}} \bar{g}_{k-2m} C_{0,k}$$

一般地 $C_{n,m} = \sum_{k \in \mathbb{Z}} C_k^{n-1} \bar{h}_{k-2m}, D_{n,m} = \sum_{k \in \mathbb{Z}} C_k^{n-1} \bar{g}_{k-2m}$

若记 H, G 为 $\ell^2 \rightarrow \ell^2$ 的如下算子, $\forall (C_j) \in \ell^2$

$$(HC)_n = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{k \in \mathbb{Z}} C_k \bar{h}_{k-2n}$$

$$(GC)_n = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{k \in \mathbb{Z}} C_k \bar{g}_{k-2n} \quad (4)$$

则上述分解如图 1 所示:

把 C^0 分解为 d^1, d^2, \dots, d^n 和 C^N 的分解称为有限正交小波分解。对数字信号而言, 我们

可以直接把 C^0 定义为待分解的数字信号 $f(n)$. 因而这种分解是完全离散的甚至不涉及到函数 Ψ 和 φ 的具体形式.

在本文的计算中,取滤波器系数为: $h_0 = 0.125, h_1 = 0.375, h_2 = 0.375, h_3 = 0.125,$
 $g_0 = -2.0, g_1 = -2.0.$

同理,信号的重构计算有: $C_j = H^* C_{j+1} + G^* D_{j+1}, j = J-1, \dots, 0.$

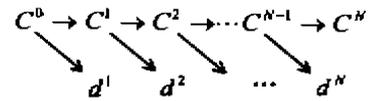


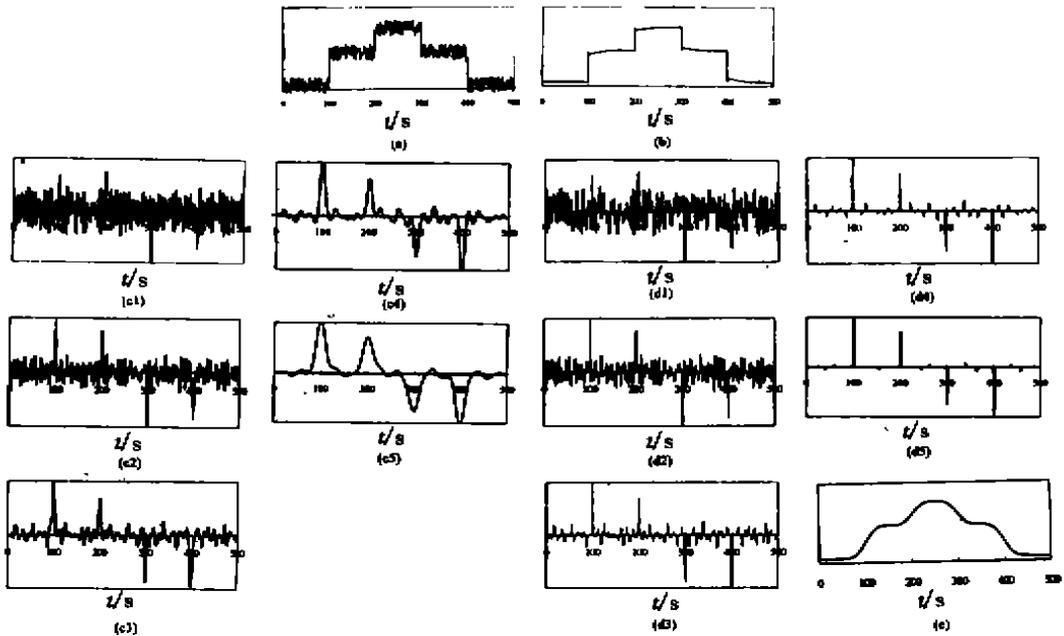
图 1 有限正交小波分解

2 用小波变换识别绕组变形

2.1 小波的去噪特性

从上面的分析可知,借助于信号突变点与噪声的小波特性的截然不同来进行非线性滤波,具有根高的时间(位置)分辨率,可从强噪声信号中有效地提取微弱的真实信号。这是传统的去噪方法所不可比拟的。

本文通过对一加噪信号的实验验证了小波去噪的特性。实验结果如图 2 所示。



(a)——原始加噪信号; (b)——剔除噪声后的小波重建信号; (c1)——(c5)——有限尺度离散小波变换; (d1)——(d5)——各尺度上的模极大值; (e)——平滑信号

图 2 加噪信号的小波变换及模极大值

上述的理论分析和图 2 所示的实验结果表明:信号的突变点在小波变换的各个尺度下都表现为模极大值且符号不变,而白噪声不能确定;信号的突变点的模值在各尺度下相差很小且稠度不变,而白噪声的模值随尺度的增加下降很快同时稠度减小。这样随着尺度的增

加,信号突变点与白噪声的模极大值之比越来越大,根据信号的突变点与白噪声的差别,将由白噪声产生的模极大值剔除,经提炼后的模极大值主要是由有用信号产生的,它包含了原始信号的主要特征。

用LVI法检测变压器绕组变形时,由于各次测量的接地方式不同、引线的长短及位置不同、低压脉冲源的分散性以及测试现场周围物体的邻近效应等的差异,从测得的信号来看,测量的重复性很差。显然,利用小波变换对原始信号进行有效除噪后,表现出的测量重复性明显变好。以上分析说明:经小波变换后,从各尺度及平滑信号上看,测量的重复性较好,有助于判断变压器绕组的状况。

2.2 变压器绕组变形的识别

在变压器绕组变形检测的LVI法中,利用小波变换剔除干扰后,将各尺度上的模极大值进行五点三次平滑,设该尺度上的模极大值表达式为 $T_j f(n)$, $1 \leq n \leq N$, $1 \leq j \leq J$,则对于信号 $f(t)$ 和 $g(t)$,可定义尺度距离^[5]

$$D(T_f, T_g)^2 = |T_j f - T_j g|^2 = \sum_{k=1}^N |T_j f(k) - T_j g(k)|^2$$

用于变压器绕组状态的识别。

虽然国内外在变压器绕组变形的研究方面做了大量工作,但到目前为止,仍然停留在“对比响应曲线的变化,凭经验对变压器绕组状态进行识别”的水平,更无量化标准。从以上的分析看出,小波分解的模极大值及各尺度距离等可以作为判定变压器绕组变形的特征量。

已有经验表明:变压器绕组频响特性曲线的低频部分对电感的变化较敏感,中频部分对局部电容变化较敏感,而高频部分对地电容的改变较敏感。电感变化预示着整体变形,对地电容的变化预示着引线和分接开关的对地位置发生变化。而各个频带的特征完全可以用小波变换 $Wf(2^j, x)$ 在各个尺度上的模极大值来描述,这样就可以从小波分解的模极大值入手,利用尺度距离等概念对变压器绕组故障进行定性、定量的判断。

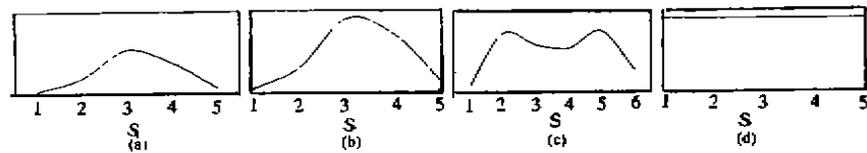
为了寻找绕组变形与尺度距离之间的关系,我们对SFS8-31500/110型变压器高压绕组的各种变形状态在同一激励信号下的低压脉冲响应进行了计算机仿真,在避免大量的算区破坏性实验的同时,从仿真结果得出了确定变压器绕组变形的类型、变形的位罝以及对变形程度进行定量描述的普遍方法。仅列出了在不同位置的两类变形情况下的仿真结果,并对此进行了说明,表1、表2所示分别为绕组不同位置(Lh)的径向或轴向变形情况下与正常状态时的低压脉冲响应曲线间的各尺度距离(D^j),图3所示为位置、尺度与尺度距离的关系。图4为三维“状态-尺度-尺度距离”(记为“L-S-D”)图。

表1 径向变形情况下与正常状态时的尺度距离

| 位置 L | D ¹ | D ² | D ³ | D ⁴ | D ⁵ |
|------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| L1 | 194.256 439 | 1 231.488 77 | 3 599.170 654 | 2 817.665 039 | 453.347 198 |
| L2 | 1 509.717 773 | 9 633.585 937 | 28 781.214 844 | 23 061.722 656 | 2 135.794 678 |
| L3 | 1 330.571 167 | 8 347.962 891 | 23 262.998 047 | 15 036.464 844 | 3 365.774 414 |
| L4 | 1 211.241 821 | 7 617.335 938 | 21 524.837 891 | 15 188.944 336 | 2 690.338 1335 |
| L5 | 1 624.937 134 | 10 288.211 914 | 29 703.314 453 | 20 190.595 703 | 1 645.024 414 |
| L6 | 563.638 733 | 3 586.639.648 | 10 624.074 219 | 8 763.604 492 | 1 483.250 61 |

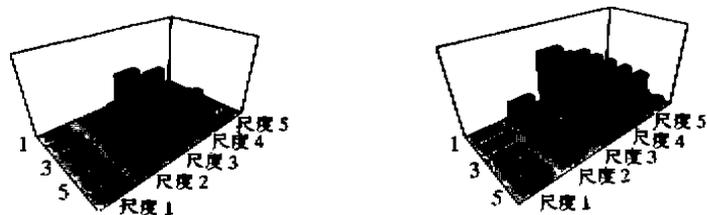
表 2 轴向变形情况下与正常状态时的尺度距离

| 位置 L | D^1 | D^2 | D^3 | D^4 | D^5 |
|------|-------------|---------------|---------------|-----------------|-------------|
| L1 | 194.959 93 | 1 235.947 998 | 3 612.856 201 | 2 829.378 418 | 455.850 952 |
| L2 | 194.238 831 | 1 231.373 535 | 3 598.828 613 | 2 817.403 076 | 453.310 425 |
| L3 | 194.260 315 | 1 231.511 353 | 3 599.218 506 | 2 817.672 607 | 453.347 015 |
| L4 | 194.260 666 | 1 231.512 573 | 3 599.226 807 | 2 817.677 734 | 453.346 863 |
| L5 | 194.257 874 | 1 231.497 314 | 3 599.193 115 | 2 817.662 235 4 | 453.347 595 |



(a) 同一位置(图示为 L3)径向变形时各尺度距离 (b) 同一位置(图示为 L3)轴向变形时各尺度距离
(c) 同一尺度(D3)不同位置径向变形时的尺度距离 (d) 同一尺度(D3)不同位置轴向变形时的尺度距离

图 3 位置、尺度与尺度距离的关系



(a) 径向变形 (b) 轴向变形

图 4 变压器绕组状态的 L-S-D 图

从表 1、图 3(a)、图 3(c) 及图 4(a) 不难看出:当变压器绕组发生径向变形时,其低压脉冲响应曲线与正常状态时的低压脉冲响应曲线的各尺度距离(D)之间相差较大,尺度 3 或尺度 4 的 D 值较大;对同一变形程度而言,不同位置的 D 值不一样,绕组中上部和中部发生变形时的 D 值较大,曲线呈“M”形。

从表 2、图 3(b)、图 3(d) 及图 4(b) 不难看出:当变压器绕组发生轴向变形时,其低压脉冲响应曲线与正常状态时的低压脉冲响应曲线的各尺度距离(D)之间相差较大,且随着尺度的增大 D 值减小;对同一变形程度而言,不同位置的 D 值不一样,绕组中上部发生变形时的 D 值较大。

将两种变形情况下的低压脉冲响应曲线相比较可以得出:轴向变形时各尺度距离相差较小;对同一变形程度而言,径向变形时绕组中部的尺度距离较大,而轴向变形时几乎处处相等^[6]。不难看出,具体针对某一绕组,可以根据其“L-S-D”图来确定绕组变形故障的类型。文献[4]的几组现场实验数据也证明了这一结论。

3 结 论

1) 信号的突变点在小波变换的各个尺度下的表现截然不同,说明小波变换能很好地区分信号的突变点与噪声,有效地剔除噪声。

2) 经小波变换后,从各尺度及平滑信号上看,测量的重复性较好。

3) 引入尺度距离作为识别变压器绕组状态的特征量,利用小波变换对变压器绕组变形的模式识别是可行的。

参 考 文 献

- [1] 秦少臻,王钰.检测变压器绕组变形的低电压脉冲法的研究[J].变压器,1997,34(7):24~29.
- [2] 秦前清,杨宗凯.实用小波分析[M].西安:西安电子科技大学出版社,1994.14~92.
- [3] 崔锦泰[美]著.小波分析导论[M].程正兴译.西安:西安电子科技大学出版社,1994.161~229.
- [4] 王钰,徐大可.小波分析在变压器绕组变形中的应用[J].高电压技术,1997,23(4):15~18.
- [5] MALLAT S, HWANG WENLIANG. Singularity detection and processing with wavelet[J]. IEEE Trans Information theory, 1992, 38(2):617~643.
- [6] 陆治军.小波变换在电力变压器绕组变形诊断中的应用研究[D].重庆:重庆大学电气工程系,1998.

Study on the Recognition of Transformer Winding Deformation Using Wavelet Transform

LU Zhi-jun¹, SUN Cai-xin², CHEN Wei-gen², LIU Sheng-he¹, DU Lin²

(1. Transformer Station, Chongqing Jiangbei Power Supply Bureau, Chongqing 401147, China;

2. College of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

ABSTRACT: This paper illustrates the methods of extracting characteristic parameters and deformation recognition using wavelet transform, which applied in low voltage impulse (LVI) method on the transformer winding deformation detection. The results show that it is effective to eliminate the noise using wavelet transform, meanwhile, it can also make measurement has repetitivity and has a property on model recognition on deformation.

KEYWORDS: low voltage impulse method; wavelet transform; deformation; recognition

(责任编辑 李胜春)