

利用二次小波变换区分变压器励磁涌流和短路电流的符号法

陈晓东¹, 柳亦钢¹, 李天云²

(1. 广东省电力调度中心 调度部, 广东 广州 510600;

2. 东北电力学院 电力系, 吉林 吉林 132012)

摘要: 通过选取合适的小波基函数, 利用小波变换对采样得到的差流进行一次或二次小波变换, 再提取小波变换系数的局部模极大值符号, 利用定义的符号识别公式即可区分对称性涌流、非对称性涌流以及内部故障电流, 还能鉴别出励磁涌流伴随内部故障情况以及电流互感器饱和采样得到的励磁涌流。Matlab 仿真及动模实验校验表明, 该方法简单有效, 不受噪声干扰, 易于在工程上实现。

关键词: 变压器差动保护; 小波变换; 模极大值; 符号识别法

中图分类号: TM 771

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)06-0048-05

0 引言

电力变压器是电力系统中极其重要的电气设备, 它的安全运行与否, 直接关系到电力系统能否连续稳定地工作。传统变压器保护均采用差动保护。如何正确地区分励磁涌流和内部故障是变压器差动保护要解决的首要问题。到目前为止, 国内、外有关文献已提出了多种鉴别励磁涌流和内部故障的方法^[1-2], 其中应用于实际工程中的主要有二次谐波原理^[3]和间断角原理^[4]。

由文献^[5]可知, 大容量变压器在某些情况下励磁涌流中的二次谐波含量仅为 7%, 而在有串补电容的高压系统及高压电缆中变压器发生故障的故障电流中的二次谐波含量可能超过 15%, 这对二次谐波原理提出了挑战。间断角原理是以准确测量间断角的大小为基础的, 但由于受电流互感器(TA)饱和的影响及采样频率的限制, 使得该原理在微机差动保护的实际应用效果并不理想。因此, 进一步探索更快速、准确地区分变压器的励磁涌流和短路电流的新原理是十分必要的。

本文采用的方法是基于间断角原理的基础上提出来的。利用小波变换提取励磁涌流的间断角特征, 无需定量计算间断角的大小, 通过一次或二次小波变换的模局部极大值符号判断间断角的有无, 定性地区别励磁涌流。仿真结果表明, 该方法对 TA 饱和和具有较强的鲁棒性。

1 小波奇异性检测理论

1.1 基本原理

设 $\Psi(t)$ 为平方可积函数, 即 $\Psi(t) \in L^2(R)$, 若其傅里叶变换 $\Psi(\omega)$ 满足条件

$$\int_R \frac{|\Psi(\omega)|}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (1)$$

则称 $\Psi(t)$ 为一个基小波。

对于任意的函数 $f(t) \in L^2(R)$ 的小波变换为

$$W_f(a, b) = \langle f, \Psi_{a,b} \rangle = |a|^{-1/2} \int_R f(t) \overline{\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (2)$$

本文算法采用建立在多分辨率分析基础上的 Mallat 算法, 即快速离散小波变换算法:

$$\begin{aligned} d_j(n) &= \sum_k \bar{g}(k-2n) c_{j-1}(k) = [c_{j-1}(n) * \bar{g}(-n)] \downarrow_2 \\ c_j(n) &= \sum_k \bar{h}(k-2n) c_{j-1}(k) = [c_{j-1}(n) * \bar{h}(-n)] \downarrow_2 \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $d_j(n)$ 和 $c_j(n)$ 分别表示原始信号分解成的小波系数序列和逼近系数序列; “*” 表示卷积; “ $\downarrow_2$ ” 表示从滤波后的序列中抽取第偶数个采样点; $g(n)$ 、 $h(n)$ 分别为高通滤波器和低通滤波器系数, n 为采样点。

1.2 小波奇异性检测原理

定义: 在某一尺度 a_0 下, 如果存在一点 (a_0, b_0) , 对 b_0 的某一邻域内的任意点 b , 有 $|W_f(a_0, b)| \leq |W_f(a_0, b_0)|$, 则称 $|W_f(a_0, b_0)|$ 为小波变换的模极大值^[6]。

小波变换 $Wf(s, x)$ 就是信号 $f(x)$ 在各尺度下被光滑函数平滑后的一阶导数, 函数一阶导数绝对值为极大值时所对应的点, 即为函数的突变点。因此, 当小波取为光滑函数的一阶导数时, 小波变换 $Wf(x)$ 模极大值的点就对应于信号 $f(x)$ 的突变点。

由于间断角的两端为信号突变点, 通过小波变换可将这一突变放大并显示出来。

1.3 小波基函数选择

小波变换的实质是将信号向一系列小波基上进行投影, 将其分解到不同的频带上。在工程应用中, 一个十分重要的问题是最优小波基的选择问题^[7]。

由于本方法只利用小波变换系数,不需重构,所以对正交性要求不高;对信号突变时刻要求精确检测,所以要求对称性;保护要求迅速作出判断,即计算要尽可能简单,所以消失距要小。根据小波基函数各自的性质及大量仿真分析,本文选取 db1 小波作为小波基函数对信号进行检测^[8]。

db1 小波的滤波器长度为 2,计算一个小波系数只需要 2 个乘法 and 1 个加法。若采样频率为 $f=216\times 50\text{ Hz}$,即每周期有 216 个采样点,则利用 db1 小波对信号进行变换,每周期将计算出 108 个一尺度小波系数、54 个二尺度小波系数、27 个三尺度小波系数、14 个四尺度小波系数。若采用现代 DSP 芯片,乘法运算的计算速度约为 25 ns,则计算出四尺度高频系数所用时间不到 1 ms,所以利用 db1 小波变换完全符合实时要求。

1.4 采样信号的消噪

噪声的存在会降低分析方法效果,甚至会导致分析方法失效。小波变换是线性变换,因此,检测信号的小波变换值也是由原始扰动信号的小波变换值和噪声的小波变换值叠加而成的。由文献[9]可知,函数的奇异性与小波变换模极大值之间有以下关系:

如 x_0 为函数的局部奇异点,即在该点上函数的小波变换有极大值,在 x_0 的某个邻域内对任意给定的 $\alpha<1$,存在一常数 A ,使

$$|W_2^j f(x)| \leq A (2^j)^\alpha \tag{4}$$

因此,有

$$\log_2 |W_2^j f(x)| \leq \log_2 A + \alpha j \tag{5}$$

式中 j 为整数。

可以证明高斯白噪声的 Lipschitz 指数 $\alpha<0$,白噪声的小波谱将随着尺度的增加而逐渐消失,从而主要集中在小尺度上。而一般励磁涌流具有正的 Lipschitz 指数,其小波变换模极大值的幅值随尺度 j 的增大而增大。于是,根据电流信号和噪声的小波变换模极大值在不同尺度上的传递特性的不同,选取适当的尺度(本方法选择四尺度高频系数),可自动消除白色噪声的影响。

2 方法实现

本方法数字仿真的采样频率为 10 kHz,利用 db1 小波对信号进行六尺度分解。噪声主要分布在一至三小尺度上,故本课题选取四尺度高频系数寻找过零点对应的模极大值,所受干扰最小。

对采样信号进行小波变换,可以发现,非对称性涌流、内部故障及励磁涌流伴随内部故障的四尺度高频系数局部模极大值均以正、负交替的形式出现,而对称性涌流会出现相邻同符号的局部模极大值,故当对信号进行小波变换提取的局部模极大值出现相邻同符号的模极大值,即可判别为对称性励磁涌流。对非对称涌流、内部故障及励磁涌流伴随内部故障的四尺度高频系数进行第 2 次小波变换,小波

函数仍选择 db1,提取一尺度高频系数。此时,非对称性涌流第 2 次小波变换的一尺度高频系数局部模极大值会出现相邻同符号的模极大值,而内部故障和励磁涌流伴随内部故障的小波系数局部模极大值仍然正、负交替出现。通过这一现象可以鉴别出非对称性涌流。

仿真表明,即使 TA 饱和,励磁涌流的小波系数局部模极大值仍能出现相邻同号现象,故该方法对 TA 饱和有较强的鲁棒性。

2.1 对称性涌流的鉴别

图 1 为对称性涌流及其小波变换四尺度高频系数图。

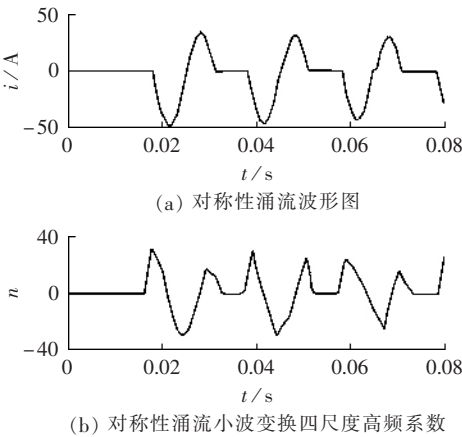


图 1 对称性涌流及其 DWT 四尺度高频系数
Fig.1 Symmetry inrush current and the forth scal coefficients of its wavelet transform

由图1(b)可见,每个局部模极大值都对应着图 1(a)的过零点(包括信号的正常过零点和间断角边缘点,但由于小波变换零极点偏移现象,会有稍许偏差)。观察局部模极大值的符号可以发现,它们不是正负交替的,中间会出现两相邻局部模极大值符号相同的情况,且这 2 个相同符号的局部模极大值对应的是采样信号间断角的边缘。

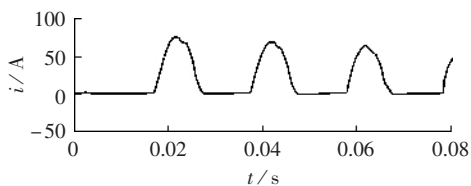
2.2 非对称性涌流的鉴别

图 2 为非对称性涌流和小波变换系数图。由图 2(b)可见,四尺度高频系数局部模极大值的符号是正、负交替出现的,而对四尺度系数进行二次小波变换,提取的一尺度高频系数(见图 2(c)的局部模极大值符号中出现了相邻同号的现象,且这 2 个相同符号的局部模极大值仍对应的是采样信号间断角的边缘。

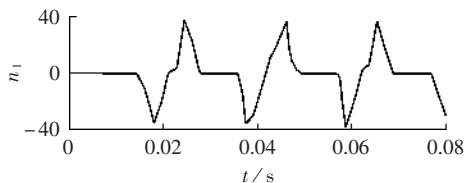
其实,非对称性涌流的四尺度小波变换高频系数和对称性涌流的波形极为相似,有正、负幅值且有相应的间断角(见图 1(a)和图 2(b)),故对其再进行一次小波变换,即可得到与对称性涌流一次小波变换相同的结论。

2.3 对内部故障的鉴别

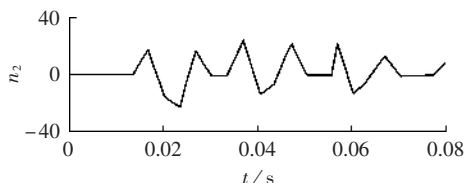
对内部故障鉴别的波形及小波变换高频系数如图 3 所示。



(a) 非对称性涌流波形图



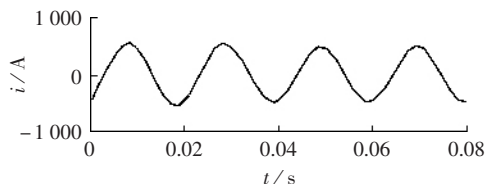
(b) 非对称性涌流小波变换四尺度高频系数



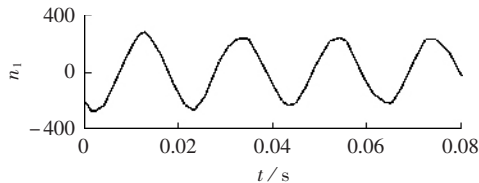
(c) 二次小波变换一尺度高频系数

图 2 非对称性涌流和其小波变换系数

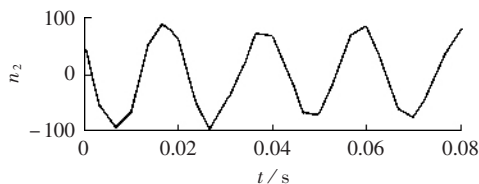
Fig.2 Asymmetry inrush current and its wavelet transform coefficients



(a) 内部故障波形图



(b) 内部故障小波变换四尺度高频系数



(c) 内部故障小波变换四尺度高频系数的二次小波变换一尺度高频系数

图 3 内部故障电流及其小波变换系数

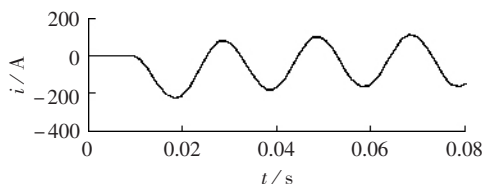
Fig.3 Internal fault current and its wavelet transform coefficients

由图 3(b)可见,四尺度高频系数的局部模极大值的符号是正、负交替出现的,且其波形和原信号波形非常相似,近似呈正弦分布。故其四尺度系数的第 2 次小波变换一尺度高频系数仍近似呈正弦分布,即局部模极大值符号仍正、负交替出现。

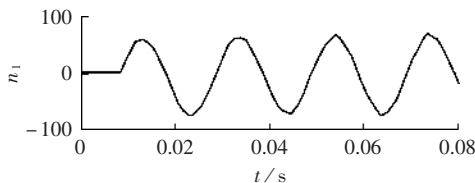
2.4 励磁涌流伴随内部故障

励磁涌流伴随内部故障的涌流波形和小波变换高频系数图如图 4 所示。

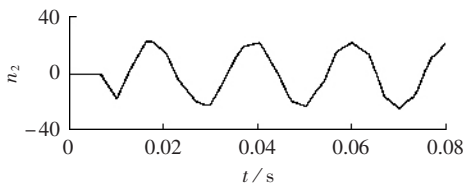
由图 4(a)可见,励磁涌流伴随内部故障发生时,



(a) 励磁涌流伴随内部故障波形图



(b) 励磁涌流伴随内部故障小波变换四尺度高频系数



(c) 二次小波变换的一尺度高频系数

图 4 励磁涌流伴随内部故障及其小波变换系数

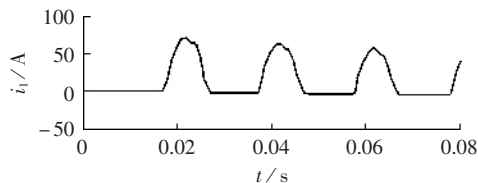
Fig.4 The inrush current with internal fault current and its wavelet transform coefficient

间断角消失。由图 4(b)可见,四尺度高频系数局部模极大值的符号是正、负交替出现的,且其波形和原信号波形非常相似。故其四尺度系数的第 2 次小波变换一尺度高频系数仍和其本身一样,局部模极大值符号正、负交替出现。

2.5 TA 饱和时对励磁涌流的鉴别

以上分析的是一次侧电流的特征,而保护处理的是经 TA 传变的二次侧电流。线性 TA 不存在饱和问题,而实际运行中的 TA,由于励磁电流很大且存在直流偏移,因而有可能出现饱和。TA 饱和问题一直是困扰变压器差动保护原理的重要问题之一。因此,鉴别方法对 TA 饱和时的鲁棒性分析十分重要。实际中非对称性涌流的数值比对称性涌流大很多。引起饱和的一个重要原因是原边电流中非周期分量的影响,本文主要考虑了非对称性涌流的饱和问题,如图 5 所示。

由图 5(b)可见,涌流波形经饱和的 TA 后,间断角消失;由图 5(c)可见,二次波形经小波变换后,四尺度高频系数出现了间断角,且该波形和对称性涌流波形相似;由上述分析可知,其高频系数再次经小波变换提取的一尺度高频系数必会出现相邻同符号的局部模极大值。



(a) 非对称性涌流波形图

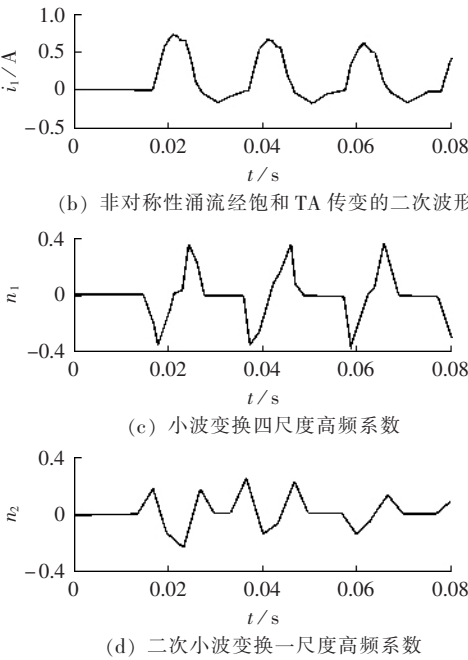


图 5 饱和电流互感器传变的励磁涌流及其小波变换系数

Fig.5 The inrush current with saturated current transformer and its wavelet transform coefficients

表 1 小波变换模极大值符号统计表
Tab.1 Modulus maximum sign table of DWT

第 i 个模极大值 ($i=$)	励磁涌流			内部故障电流		励磁涌流伴随内部故障电流		TA 饱和时的励磁涌流	
	对称性	非对称性							
	L_1	L_1	L_2	L_1	L_2	L_1	L_2	L_1	L_2
1	+	-	+	-	-	+	-	-	+
2	-	+	-	+	+	-	+	+	-
3	+	-	+	-	-	+	-	-	+
4	+	+	+	+	+	-	+	+	+
5	-	-	-	-	-	+	-	-	-

注: L_1 为一次小波变换, L_2 为二次小波变换。

4 结论

本文通过对差流进行一次或二次小波变换,利用提取的小波系数模极大值的符号判断差流是励磁涌流还是内部故障电流引起的,并能判别出励磁涌流伴随内部故障。Matlab 仿真^[10]及动模实验校验表明该方法具有以下优点:

- a. 利用模极大值的符号能定性地检测出间断角的存在,不需定量地计算间断角的大小;
- b. 该方法只需采样 1 个周期的信号,判断时间短,利于保护的速断性;
- c. 该方法对 TA 饱和具有很强的鲁棒性;
- d. 该方法受噪声的影响小。

参考文献:

[1] KUKIAKI Y. Power differential method for discrimination between fault and magnetizing inrush current in transformers[J]. IEEE Trans on Power Delivery,1997(12):72-92.
[2] 王国兴,张传利,黄益庄. 变压器励磁涌流判别方法的现状及发展[J]. 中国电力,1998,31(10):14-17.

3 符号识别法

利用符号识别法可以直接判别出间断角的存在。

定义 1:

$$\text{sign}(i)=\begin{cases}1 & \Psi(i)>0 \\ 0 & \Psi(i)<0\end{cases}\tag{5}$$

式中 $\Psi(i)$ 为小波变换第 i 个局部模极大值系数。

定义 2:

$$\Omega(i)=\text{sign}(i)\otimes\text{sign}(i+1)\tag{6}$$

式中 $\otimes$ 表示异或。

当 $\Omega(i)=0$ 时,说明相邻的 2 个局部模极大值符号相同,可判断发生了励磁涌流。

模极大值符号统计见表 1。对称性励磁涌流的一次小波变换的 $\Omega(3)$ 为 0,应对保护进行闭锁;非对称性涌流的一次小波变换的 $\Omega(i)$ 均为 1,二次小波变换的 $\Omega(3)$ 为 0;带有内部故障的情况一次或二次小波变换的 $\Omega(i)$ 均为 1,保护应动作;TA 饱和时,二次小波变换的 $\Omega(3)$ 为 0,仍闭锁保护。

WANG Guo-xing,ZHANG Chuan-li,HUANG Yi-zhuang. The methods to distinguish inrush current of transformer and its development[J]. Electric Power,1998,31(10):14-17.
[3] 邱文征,陈德树. 两种励磁涌流二次谐波制动判据的比较[J]. 电力自动化设备,1998,18(3):17-19.
QIU Wen-zheng,CHEN De-shu. Two differential method for discrimination magnetizing inrush current in transformers by second harmonic[J]. Electric Power Automation Equipment,1998, 18(3):17-19.
[4] 全玉生,李洪杰,严璋. 应用小波变换测量间断角的新方法[J]. 电力系统自动化,1998,22(11):8-11.
QUAN Yu-sheng,LI Hong-jie,YAN Zhang. A new method for discrimination rush based on wavelet[J]. Automation of Electric Power Systems,1998,22(11):8-11.
[5] AKAGI H,KANAZAWA Y,NABAE A. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,1984,20(10):25-34.
[6] 彭玉华. 小波变换与工程运用[M]. 北京:科学出版社,1999.
[7] 杨福生. 小波变换的工程分析与应用[M]. 北京:科学出版社, 1999.
[8] 崔景泰. 小波分析导论[M]. 西安:西安交通大学出版社,1995.
[9] 欧阳森,宋政湘,陈德桂,等. 小波软阈值去噪技术在电能质量检测中的应用[J]. 电力系统自动化,2002,26(19):56-60.
OUYANG Sen,SONG Zheng-xiang,CHEN De-gui,et al. Appli-

- cation of wavelet soft-threshold de-noising technique to power quality detection [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(19): 56-60.
- [10] 刘兴杰, 田建设, 丁波, 等. 应用 Matlab 进行电力系统分析和动态仿真[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(3): 42-45.
LIU Xing-jie, TIAN Jian-she, DING Bo, et al. Power system analysis and simulation with Matlab[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(3): 42-45.
- [11] 褚云龙, 张保会, 郝治国. 新技术手段在变压器差动保护励磁涌流识别中应用研究的现状[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(8): 87-91.
CHU Yun-long, ZHANG Bao-hui, HAO Zhi-guo. Application of new techniques in magnetizing inrush current identification for transformer differential protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(8): 87-91.
- [12] 杨钟皓, 董新洲. 基于小波变换的变压器励磁涌流识别方法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2002, 42(9): 1184-1187.
YANG Zhong-hao, DONG Xin-zhou. Method for exciting inrush detection in transformers using wavelet transform[J]. Journal of Tsinghua University: Sci & Tech, 2002, 42(9): 1184-1187.
- [13] 焦邵华, 刘万顺, 刘建飞, 等. 用小波理论区分变压器的励磁涌流和短路电流的新原理[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(7):

1-5, 76.

- JIAO Shao-hua, LIU Wan-shun, LIU Jian-fei, et al. A new principle of discrimination between inrush current and fault current of transformer based on wavelet[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(7): 1-5, 76.
- [14] 王莉丽, 荣雅君. 基于小波神经网络的变压器励磁涌流和内部故障电流识别[J]. 继电器, 2003, 31(7): 20-22, 53.
WANG Li-li, RONG Ya-jun. Discrimination between inrush current and internal fault current of transformer based on wavelet neural network[J]. Relay, 2003, 31(7): 20-22, 53.

(责任编辑: 李 玲)

作者简介:

陈晓东(1975-), 男, 湖北黄冈人, 硕士研究生, 研究方向为非线性系统理论在电力系统中的应用(E-mail: cxd0612.student@sina.com);

柳亦钢(1971-), 男, 广东广州人, 研究方向为继电保护、电力系统安全稳定装置研究等;

李天云(1945-), 男, 吉林吉林人, 教授, 从事自动控制理论、信号处理、非线性系统理论的教学及其在电力系统中的应用研究。

Sign identifying method to discriminate inrush current and fault current of transformer based on twice wavelet

CHEN Xiao-dong¹, LIU Yi-gang¹, LI Tian-yun²

(1. Electric Power Dispatcher Center of Guangdong Province, Guangzhou 510600, China;

2. Northeast of China Electric Power Institute, Jilin 132012, China)

Abstract: With selected appropriate wavelet fundamental functions, the sampled differential current is transformed once or twice, and with the extracted sign of the local modulus maximum of wavelet coefficients and the defined sign identification function, the symmetrical inrush, the asymmetrical inrush and the internal fault current are distinguished from each other, as well as the excitation inrush accompanying with the internal fault current or the current transformer saturation is distinguished. Simulations with Matlab and experiments prove that the method is simple, effective, free from noise and easy to be implemented.

Key words: transformer differential relay; wavelet transforms; modulus maximum; sign identifying method