

文章编号:1007-6492(1999)02-0008-04

小波包算法在电力变压器局放信号检测中的应用

高金峰¹, 李祥飞², 王俊鹄²

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 郑州工业大学电气信息工程学院, 河南 郑州 450002)

摘要:分析了电力变压器局部放电信号检测现场的各种干扰, 设计了用于计算机模拟并仿真现场干扰的局部放电检测信号。在对小波及小波包算法介绍的基础上, 将小波包分解与重构算法用于强载波及无线电干扰下的变压器局部放电信号检测问题, 并对模拟的局部放电信号进行了小波包分解与重构的计算机模拟。模拟结果表明, 小波包分解与重构算法可以从强载波及无线电干扰中检测出局部放电信号并且具有良好的性能。

关键词:局部放电; 小波包; 干扰

中图分类号: TP 391 **文献标识码:** A

事故分析结果表明, 局部放电逐步发展导致绝缘破坏, 是电力变压器事故的主要原因。因此, 在线检测局部放电信号具有重要意义。但在电力变压器运行现场, 存在各种干扰源, 给局放信号的检测带来很大困难^[1,2]。

目前大多采用基于傅里叶变换的数字滤波或组合硬件滤波器等方法检测局放信号, 但经过滤波器过滤后局放信号中相当部分的能量有可能损失, 若出现未知频率的新干扰时, 原有的滤波器就会失效。而采用小波变换方法来分析局放信号能克服上述缺陷。

文献[3,4]针对载波通信等缓变干扰提出了3种基于小波变换的放电脉冲提取方法, 有一定的实用性。但其小波包变换方法中没有对分解信号进行重构, 无法确定局放脉冲发生的时刻, 丢失了检测局放信号的一个重要信息。因为对局放信号的检测, 除需要获得每次的放电强度(放电量)外, 还应测量放电发生时刻的工频电压相位及每秒内的放电次数, 而且其检测的放电强度与原信号有较大差异。文献[5]中利用了连续小波变换, 选用8种不同的小波函数对强载波干扰下的局放信号进行检测, 通过对比得出中心频率高的小波函数能更好地抑制载波干扰。

本文在给出评价检测方法有效性依据的基础

上, 给出了小波包分解与重构算法。计算机模拟结果表明, 本文采用的方法, 不仅可以有效地抑制缓变载波周期干扰信号, 而且可以准确地确定局放脉冲信号的幅度及其发生时刻。当采样频率进一步提高时, 射频干扰也可以消除。

1 小波变换基本原理及小波包分解与重构算法

1.1 小波变换基本原理^[6]

所谓小波变换就是用小波函数系逼近信号, 小波函数系由小波函数通过平移和伸缩构成。设母小波函数为 $\Psi(t)$, 伸缩和平移因子分别为 a 和 b , 则小波函数

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

设小波的容许条件成立, 即

$$C_\Psi = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\hat{\Psi}(w)|}{|w|} dw < \infty, \quad (2)$$

式中: $\hat{\Psi}(w) = \int_{-\infty}^{\infty} \Psi(t) e^{-jw t} dt$ 是 $\Psi(t)$ 的傅氏变换。信号 $f(t)$ 的连续小波变换为

$$\begin{cases} W_f(a, b) = \langle f, \Psi_{a,b} \rangle \\ \Psi_{a,b} = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{\Psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \end{cases}, \quad (3)$$

由 $W_f(a, b)$ 重构信号 $f(t)$ 的小波逆变换为

收稿日期: 1999-01-15; 修订日期: 1999-02-19

基金项目: 河南省自然科学基金资助项目(984060100)

作者简介: 高金峰(1963-), 男, 河南省项城市人, 郑州工业大学副教授, 西安交通大学博士研究生, 主要从事非线性电路系统理论方面的研究。

$$f(t) = \frac{1}{C_{\Psi}} \int_R \int_R W_f(a, b) \bar{\Psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) da db, \quad (4)$$

通过调节尺度参数 a , 可使得小波函数具有非均匀的时频分辨率。它具有高频时, 频窗大, 时窗小; 低频时, 频窗小, 而时窗大的良好性能。但实际应用中只有采用变换快速算法, 才使小波变换具有工程意义, 因此, 人们先后研究了多种方法。

1.2 小波包分解与重构算法

S. Mallat 首先将多尺度的概念应用于小波变换, 利用正交滤波器, 结合二抽取一运算提出了离散小波变换的一种快速算法, 即 Mallat 算法^[7]。

分解公式

$$C_k^j = \sum_n h(n-2k) C_k^{j-1}; \quad (5)$$

$$d_k^j = \sum_n g(n-2k) C_k^{j-1}. \quad (6)$$

重构公式

$$C_k^j = \sum_k h(k-2n) C_k^{j-1} + \sum_k g(k-2n) C_k^{j-1}. \quad (7)$$

式中: d_k^j 代表分辨率 j 下的离散细节信号, 即该分辨率下小波变换所得到的序列, 对应于高频成份; C_k^j 代表分辨率 j 下的离散“模糊”信号, 即该分辨率下对原信号的平滑逼近, 对应于低频成份; h, g 分别为正交镜像滤波器的低通和高通冲激响应系数。

在有些情况下, 根据需要不仅将 C_k^j 进行分解, 同时也将 d_k^j 进行分解, 这种空间分解可以一直进行下去(当然分解次数应小于 $N, 2^N = n, n$ 为采样点数), 频率空间被越分越细, 这样反复利用二抽取一运算, 以实现更高分辨率的分解, 这就是小波包算法。

小波包分解公式

$$x_{2m}^j(n) = \sum_k h(k-2n) x_m^{j-1}(k), \quad (8)$$

$$x_{2m+1}^j(n) = \sum_k g(k-2n) x_m^{j-1}(k); \quad (9)$$

小波包重构公式

$$x_m^{j-1}(n) = \sum_k \bar{h}(n-2k) x_{2m}^j(k) + \sum_k \bar{g}(n-2k) x_{2m+1}^j(k), \quad (10)$$

式中: $x_m^j(n)$ 为序列 $f(n)$ 经 j 层小波包分解所得到的第 m 个分解序列; \bar{h}, \bar{g} 分别为 h 和 g 的对偶算子。

2 小波包算法在检测局放信号中的应用

2.1 仿真信号

文献^[8,9,10]中的大量实验数据表明, 局部

放电脉冲为指数衰减型或指数衰减振荡型。脉冲的上升沿很陡, 约为 $0.1 \mu\text{s}$, 因此, 局放脉冲的频率谱很宽, 约在 10 MHz 以上。若采用 6 MHz 的频率进行采样, 上升沿也只有一个采样点, 因而可以认为上升时间为零。设放电电压为 $u(t)$, 脉冲幅值为 V , 脉冲峰值出现位置为 t_0 , 时间常数 τ 取 $2 \mu\text{s}$, 脉冲为指数衰减振荡型时, w_0 取 60 kHz ^[8], 单个放电脉冲分别表示为

指数衰减形式

$$u(t) = \begin{cases} V \cdot e^{-(t-t_0)/\tau} & t \geq t_0; \\ 0 & t < t_0. \end{cases} \quad (11)$$

指数衰减振荡形式

$$u(t) = \begin{cases} V \cdot e^{-(t-t_0)/\tau} \cos(w_0 t) & t \geq t_0, \\ 0 & t < t_0. \end{cases} \quad (12)$$

尽管局放脉冲出现的时刻与工频电压的相位有一定关系, 但随着时间的变化, 其放电强度及放电时刻仍然是随机的, 因此, 在实际进行信号仿真时, 取式(11)、式(12)中的脉冲强度为 $1 \sim 10$ 之间均匀分布的随机数, 峰值位置 t_0 也是一个随机整数。

电力通信载波的频率在 $40 \sim 500 \text{ kHz}$ 之间, 其波形为调幅波或调相波。分别具有下面的表达式:

调幅波

$$s_1(t) = A_1 \sin(w_1 t) \sin(w_2 t), \quad (13)$$

调相波

$$s_2(t) = A_2 \sin(w_2 t + A_3 \sin w_1 t), \quad (14)$$

式中: A_1, A_3 与 w_1 为调制信号的振幅和角频率, A_2 与 w_2 分别为载波信号的振幅和角频率。

在模拟载波干扰信号时, 使 A_1, A_2, A_3, w_1, w_2 均是在特定范围内变化的随机值。为评价各种方法检出信号的能力, 在设计标准信号时取干扰信号的幅值与局放信号的幅值之比为 $30:1$ 。

经随机选取各量后的一组仿真信号为:

$$\begin{aligned} f(t) = & 6.0 \sin(800\pi t \times \sin(8 \times 10^4 \pi t)) + \\ & 6.0 \sin(1.2 \times 10^3 \pi t \sin(1.2 \times 10^5 \pi t)) + \\ & 28 \sin(2.4 \times 10^5 \pi t + \sin(2.4 \times 10^3 \pi t)) + \\ & 14 \sin(3 \times 10^5 \pi t \sin(3 \times 10^3 \pi t) + \\ & 15 \sin(4.2 \times 10^5 \pi t + \sin(420\pi t)) + \\ & 10 \sin(540\pi t \sin(5.4 \times 10^5 \pi t) + \\ & 6 \sin(700\pi t \sin(7 \times 10^5 \pi t) + \\ & 10 \sin(600\pi t \sin(8.4 \times 10^5 \pi t) + \end{aligned}$$

$$16\sin(1 \times 10^5 \pi t + \sin(800\pi t)) +$$
$$p_1 + p_2 + p_3 + p_4, \tag{15}$$

当采样频率采用 6 MHz 时,取采样点数等于 1024,局放信号和合成后的待检测信号分别如图 1、图 2 所示.

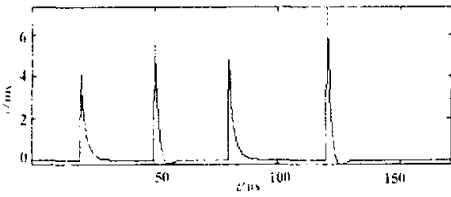


图 1 仿真的局放信号

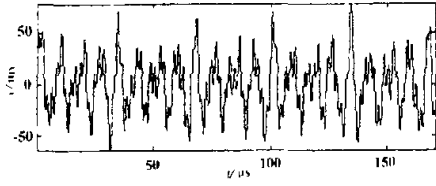


图 2 仿真的现场信号

2.2 采用的具体做法

本文选用 Daubechies 滤波系数 $N = 6$,高通滤波器系数按 $g_n = (-1)^n h(2N - 1 - n)$,采用式(8)和式(9)对式(15)表达的仿真信号进行分解.在小波包分解过程中,每分解一次数据长度减半,由于原采样数据长度为 1024($2^N = 1024, N = 10$),分解 4 次共有 2^4 段数据,每段数据长度为 64 个数据,如图 3 所示.其中 $j = 1$ 层中右段数据对应 $f(n)$ 中的低频信息,而左段数据对应 $f(n)$ 中的高频信息.同样在 $j = 2$ 层中第 4 段数据对应 $j = 1$ 层左段数据中的高频信息,从中可看到 4 个脉冲信号.因此同一层中的不同数据段对应的信息具有不同的频率范围.表 1 中的第 3 列列出了 $j = 2$ 层中所提取出来的 4 个局放脉冲峰值比.从表中数据看出,虽然说仅利用小波包分解算法就可以从强干扰信号中检测出脉冲信号,但检测出的脉冲信号的位置信息已丢失.因此,仅靠分解算法检测局放信号是不够的.

表 1 用小波包算法检测的结果

脉冲序号 (i)	原始局放信号 $p_i/\mu s$	峰值比 (s_i/s_i')	检测的局放信号 $p_i'/\mu s$	峰值比 (s_i/s_i')	峰值比 (s_i/s_i')
1	19.83	0.2175	19.83	1.0753	1.3034
2	49.83	0.2062	49.83	1.0638	1.2291
3	79.84	0.2147	79.84	1.0694	1.2667
4	119.85	0.2125	119.85	1.0574	1.0821

表 1 中 p_i 表示原始局放信号峰值位置, p_i' 表示检测出的局放信号峰值位置, s_i/s_i' 表示检测出的局放信号与原始局放信号的峰值比.

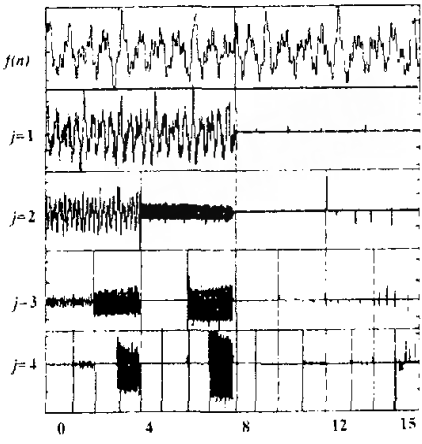


图 3 小波包的分解

如前所述,由于周期载波干扰位于前面的低频区域,若将 $j = 4$ 层中 0~8 段数据置为零,去掉低频段的数据,保留 9~15 段数据,采用式(10)重构信号,结果如图 4 所示.

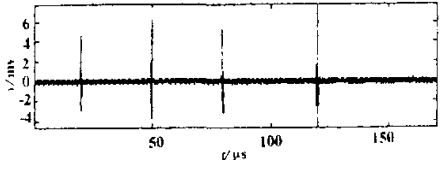


图 4 小波包重构的结果

为衡量小波变换在提取有用信号中的有效性,主要应考察从干扰中提取出的信号与原信号相比,其时间轴和波形形状的失真情况.若某种方法从干扰中不失真地恢复出原信号,则该方法是有用的.但在实际应用中,并不都需要完全不失真地恢复原信号,往往仅需要得到反映原信号的有用信息.在局放脉冲检测中,需要了解的仅是局放脉冲出现的准确时刻和强度.因此,本文采用提取脉冲的峰值位置与原信号脉冲峰值位置的偏差及提取脉冲的峰值与原信号的峰值之比两项指标.

定量分析的结果列于表 1 的 4、5 列,从表中数据可以看出,局放脉冲信号的峰值及其位置都得到了很好的检测结果.

可见通过小波包重构公式提取出来的局放脉冲信号更加逼近仿真的局放信号.

2.4 射频干扰信号的消除

由于天线耦合效应,现模拟一个调相无线电

信号,其幅值为 8,载波频率为 1 MHz,被载信号频率为 60 kHz,将此信号加在式(15)上,采样频率仍为 6 MHz,采样点数为 1024.采用上述小波包算法检测结果如图 5 所示,从图中可看出,检测结果中仍含有较多的无线电干扰成份.

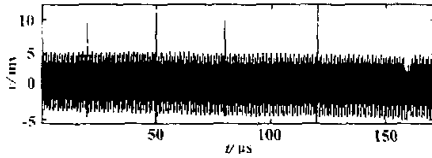


图 5 采样频率为 6 MHz 的小波包提取结果

如果将采样频率提高为 8 MHz,再利用小波包算法进行检测,结果如图 6 所示,定量对比分析见表 1 第 6 列.从图和表中可知,脉冲信号的峰值位置及峰值得到了较好的检测.

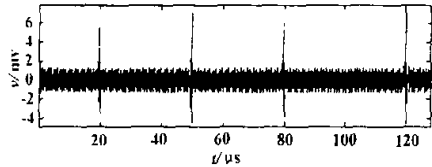


图 6 采样频率为 8 MHz 的小波包提取结果

3 结论

(1) 给出了强载波干扰下用于计算机模拟的检测信号生成方法.

(2) 在 Mallat 算法的基础上,介绍了小波包分解与重构算法.

(3) 采用小波包分解与重构算法对模拟的局放检测信号进行了计算机试验,试验结果表明,该方法具有良好的性能.

参考文献

- [1] 王昌长,王忠东,李福祺等.局部放电在线监测中的抗干扰技术[J].清华大学学报(自然科学版),1995(4):69-74.
- [2] 贾逸梅,栗福珩,蒋德福等.在线监测变压器局部放电中的干扰及抗干扰电路[J].武汉水利电力大学学报,1995(5):532-535.
- [3] 王 析,钟 升,孟凡振.用小波变换提取高压变压器局部放电脉冲的研究[J].电工技术学报,1997(4):29-33.
- [4] 王 析,钟 升,孟凡振.高压变压器局部放电脉冲提取的新方法[J].电工技术学报,1996(1):50-53.
- [5] 覃 剑,陈祥训,郑健超.连续小波变换在检测强载波干扰中局放信号的应用[J].电网技术,1998(3):42-46.
- [6] 赵松年,熊小芸.子波变换与子波分析[M].北京:电子工业出版社,1996.
- [7] 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.
- [8] 李建明,杨微可,李丽珊.局部放电信号波形及频谱特性[J].高电压技术,1990(4):37-44.
- [9] 邱昌容.电工设备局部放电及其测试技术[M].北京:机械工业出版社,1994.
- [10] 贾逸梅.高压电气设备现场测试技术[M].武汉:水利电力出版社,1994.

Application of Wavelet Packet Algorithm for Detecting the Partial Discharge in HV Transformer

GAO Jin-feng¹, LI Xiang-fei², WANG Jun-kun²

(1. College of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. College of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University of Technology, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: This paper presents a decomposition and reconstruction algorithm based on wavelet packet theory. Disturbance partial discharge signal in HV transformer was designed for computer simulating. The extraction of the partial discharge signal in HV transformer is studied. Computer simulation results show the partial discharge can be extracted from strong carried disturbance and RF disturbance by the algorithm.

Key words: partial discharge; wavelet packet; disturbance