

基于经验模态分解的自适应滤波算法 在局部放电窄带干扰抑制中的应用

钱勇, 黄成军, 戚伟

(上海交通大学电气工程系, 上海 200240)

摘要: 自适应滤波算法是当前抑制窄带干扰的有效方法。对于单频率的窄带干扰, 设置自适应滤波器的参数比较容易, 但是对于局放监测中多个频率且频率范围很宽的窄带干扰, 设置自适应滤波的参数就会变得很困难。根据经验模态分解 EMD (Empirical Mode Decomposition) 的分频特性, 将 EMD 引入自适应滤波算法, 提出了一种基于 EMD 的自适应滤波算法。局放信号中多个频率的窄带干扰经 EMD 分解之后, 会分解到不同的模态函数中, 从而将多频率的窄带干扰转化成了多个单频率的窄带干扰, 在此基础之上对固有模态函数进行自适应滤波, 可以较容易地解决自适应滤波器参数设置的问题, 并能获得比普通自适应滤波更好的效果。仿真及实际数据的处理验证了该算法的有效性。

关键词: 经验模态分解; 固有模态函数; 自适应滤波; 局部放电; 窄带干扰

中图分类号: TM721 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)22-0027-05

0 引言

检测局部放电是监测大型电力设备的绝缘状态的重要手段。近年来众多学者在这方面做了深入的研究。在实际设备运行时, 由于存在大量的现场干扰, 局放往往淹没在噪声之中, 为了获得有效的局放信息, 必须对噪声干扰加以抑制^[1]。在现场众多的干扰源中, 载波通讯、高频继电保护等引起的周期性窄带干扰的影响尤为严重, 应该作为首先抑制的对象。对于窄带干扰, 目前有多种抑制方法, 如 FFT 滤波、自适应滤波、小波变换等。其中, FFT 滤波和小波变换都是通过频域内的子带滤波来达到抑制窄带的目的, 但是如何确定窄带干扰的频率, 目前还没有可行的方法, 因而很难用于实际信号的处理。相比于其它的方法, 自适应滤波由于无需预先知道窄带干扰的频率, 可以获得较好的抑制窄带干扰的效果^[2]。但是, 众所周知, 自适应滤波算法自身也存在一些其它的问题, 就常用的最小均方 (LMS) 算法而言, 它的收敛速度较慢, 如果调整步长增加收敛速度, 又可能导致稳态误差增大甚至发散。对于单一的频率的窄带干扰, 通过 Monte-Carlo 分析, 可以得到最优的步长, 但是对于频率分布范围较宽的多频率窄带干扰 (如影响局放检测的窄带干扰往往有多种, 干扰频率从几十 kHz 到几 MHz), 自适应滤波器的参数选择就会变得很困难。为了解决这个问题, 本文引入了一种新的非平稳信号分析方法: 经验

模态分解 EMD (Empirical Mode Decomposition)。

EMD 是近年来由美国国家航空和宇宙航行局 (NASA) 提出的一种新的信号分析方法^[3]。该方法基于信号的局部特性, 可以自适应地将信号分解成不同频段的固有模态函数 MF (Intrinsic Mode Function)。局放中含有的多频率窄带干扰经 EMD 分解之后, 会分解到不同的 MF 中, 在此基础上对 MF 进行滤波, 可以将多频率窄带干扰抑制的问题转化为多个单频率窄带干扰抑制的问题, 从而解决了多频率窄带干扰下自适应滤波器参数选择困难的问题。验证这种新算法的可行性及优越性是本文研究的目的。

1 经验模态分解

1.1 EMD 的基本原理

EMD 又称为 Huang 变换。该变换方法认为, 任何复杂的信号都是由局部的调幅调频 (AM-FM) 成份构成的, 基于此, 可由复杂的信号中直接分离出从高频到低频的若干阶基本函数, 即固有模态函数。固有模态函数有两个必要条件^[3]: 极值点数目与过零点数目的差值不大于 1; 均值趋近于 0。

EMD 不支持解析式, 给定一个信号 $x(t)$, 其固有模态函数可通过如下的迭代算法得到:

- 1) 确定 $x(t)$ 的所有极值点;
- 2) 对极大值点和极小值点序列分别用 3 次样条函数进行插值, 得到 $x(t)$ 的上包络线 $u(t)$ 和下包

络线 $v(t)$;

3) 计算上、下包络线的均值线 $m(t)$

$$m(t) = (u(t) + v(t)) / 2 \quad (1)$$

4) 由下式计算得细节 $d(t)$

$$d(t) = x(t) - m(t) \quad (2)$$

如果满足固有模态函数的条件, $d(t)$ 即为 $x(t)$ 的固有模态函数;否则,将 $d(t)$ 视作新待分解信号,返回第 1步。重复上述过程,直至 $d(t)$ 满足固有模态函数的条件。

由上述过程得到的 $d(t)$ 为第 1阶固有模态函数,记作 $c_1(t)$,然后计算 $r_1(t) = x(t) - c_1(t)$, $r_1(t)$ 为对应于第 1阶固有模态函数 $c_1(t)$ 的残差。

将 $r_1(t)$ 看成一组新的待分解信号,重复上述 1~4步就可以得到原时间序列 $x(t)$ 的第 2阶固有模态函数 $c_2(t)$ 及对应的残差 $r_2(t)$,

$$r_2(t) = r_1(t) - c_2(t) \quad (3)$$

按照上面的做法,对残差进行重复迭代分解,可以得到 $x(t)$ 的所有固有模态函数 $c_j(t)$, $j=1, 2, \dots$ 。一个含有 J 阶固有模态函数的信号 $x(t)$ 经 EMD 分解后,最后可以表示为

$$x(t) = \sum_{j=1}^J c_j(t) + r_j(t) \quad (4)$$

其中: $r_j(t)$ 为最后一阶残差,是一个单调函数。

1.2 EMD 的分频特性

由前节的介绍可知,EMD 的分解原理与小波变换的是一致的,都是将信号分为高频和低频两部分,然后对低频部分进行重复迭代,进而得到信号所有频段的信息。虽然分解原理一致,二者的分频特性却相差较大。

小波分解是预定频带的分解,即每个分解的频带是固定的,每层分解都相当于固定频段的带通滤波;而 EMD 分解则不同,EMD 是完全的自适应分解,EMD 分解的第一阶固有模态函数相当于原信号的高通滤波,其余的固有模态函数相当于带通滤波,残差相当于低通滤波^[4],每个滤波的频带都是不可预知的,根据信号具体的物理构成而定。

2 基于 EMD 分解的自适应滤波算法

在自适应滤波算法中,最小均方 LMS (Least Mean Square) 算法是较常用的算法。采用 LMS 算法的横向自适应滤波器结构如图 1 所示。在图 1 中,输入信号 x 为窄带干扰和局放叠加后的信号, r 为窄带干扰的参考信号。输入信号 x 直接送主通道,同时经过 的延时得到参考信号 r ;送参考通道。

的长度只要使得 r 与 x 的相关性很小即可。 x 和 y 中的窄带干扰因其周期性所以总是相关的。参考通道中的自适应滤波器通过调整其加权,使输出 y 在均方误差最小的意义下接近相关分量——窄带干扰,而误差 e 接近于非相关分量——局放信号。

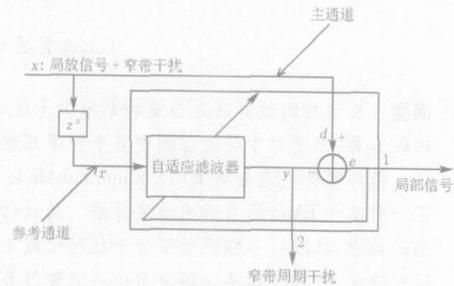


图 1 自适应滤波器去噪原理框图

Fig 1 Block diagram of the adaptive filter for denoising

在采用 LMS 算法的自适应滤波器中,权系数矩阵为

$$W(n+1) = W(n) + \mu e(n) V(n) \quad (5)$$

式中: $W(n)$ 为滤波器的权系数, $V(n)$ 为滤波器的输入信号, $e(n)$ 为滤波器的输出, μ 为收敛因子。在自适应滤波器中, μ 的选择是非常关键的,它的数值影响到收敛速度、稳定性以及收敛解的准确性。通常 $0 < \mu < \frac{1}{N \cdot P}$, 其中 N 为信号的长度, P 为信号的平均能量密度^[5]。

自适应滤波器在处理单频率的窄带干扰时,通过 Monte-Carlo 分析可以得到最优的参数,但对于频率分布较宽的多频率干扰(通信载波信号为 40 kHz ~ 500 kHz,广播信号从几百 kHz 到几 MHz),选择合适的参数就显得非常困难。这是因为系统在数据不断输入的过程中难以逼近一个固定系数的有限冲击响应(FIR)数字滤波器,所以这种滤波器的滤波效果往往不稳定,甚至会出现发散的情况。为了解决这个问题,可以先通过 EMD 将信号中的窄带干扰分解到不同的固有模态函数上,然后再对各个固有模态函数分别进行自适应滤波,这样就能将多频率窄带干扰抑制的问题转化为多个单频率窄带干扰抑制的问题。基于 EMD 分解的自适应滤波原理如图 2 所示。

3 仿真及实际信号处理

为了验证本文算法的可行性,在给出本文算法处理结果的同时,一并给出了普通自适应滤波算法的处理结果。

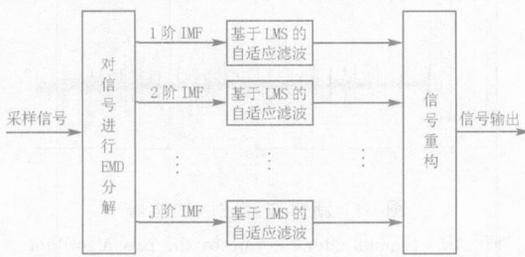


图 2 基于 EMD分解的自适应滤波原理框图

Fig 2 Block diagram of adaptive filter based on EMD

3.1 仿真信号去噪

在工程实际中,检测到的局部放电往往呈现出两种形态,指数衰减型脉冲或振荡衰减型脉冲。其中,振荡指数衰减型的局放信号由于含有明显的类窄带成分,受窄带干扰的影响较大。因而,在本文中,主要以振荡衰减型的局放为研究的对象。

振荡衰减型的局放信号,在理论研究中,通常可以用两种数学模型来表示,即单指数衰减模型和双指数衰减模型。二者在波形上有少许差别,但是对窄带干扰的抑制效果影响不大,为简洁起见,本文只选用其中的单指数衰减模型^[6]:

$$f(t) = A e^{-\alpha t} \sin(f_c \times 2\pi t) \quad (6)$$

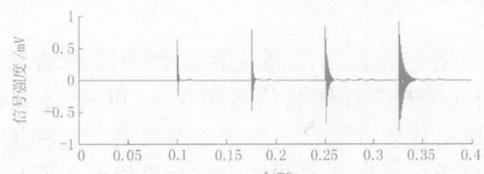
其中:A为信号幅值,α为衰减系数,fc为振荡频率。仿真时取信号幅值为1mV,衰减系数分别为0.5μs,1μs,2μs,4μs,振荡频率fc为1MHz,采样频率为10MHz,根据式(6)得到的局部放电信号见图3(a)。

仿真时选用的窄带干扰信号的表达式为:

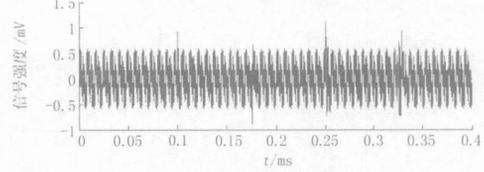
$$f = A (\sin(125k \times 2\pi \times t) + \sin(250k \times 2\pi \times t) + \sin(500k \times 2\pi \times t) + \sin(1M \times 2\pi \times t) + \sin(2M \times 2\pi \times t)) \quad (7)$$

窄带干扰的幅值A=0.2mV,干扰频率有5个主频率,分别为125kHz,250kHz,500kHz,1MHz和2MHz。叠加窄带干扰后的局放信号见图3(b)。

对于图3(b)所示含有窄带干扰的局放信号,先进行EMD分解,分解后的结果如图4所示,原信号中包含的5种不同频率的窄带干扰都被成功地分离出来了,分别对应于1~5阶固有模态函数,结合Hilbert-Huang谱(见图5,关于HH谱的问题可以参见文献[3]),能更清楚地看到这一点。由图4的分解结果,可以发现EMD和小波变换的结果比较相似。其实本质上,EMD和小波变换都是对信号进行分频,差别在于,EMD是自适应的分解,分解的频带主要取决于信号的物理构成,而小波变换是固定频带的分解,不具有自适应性,不能有效地反映信号的物理构成。



(a) 局部放电仿真信号



(b) 加入窄带干扰后的信号

图 3 局部放电仿真信号

Fig 3 Simulation signals of partial discharge

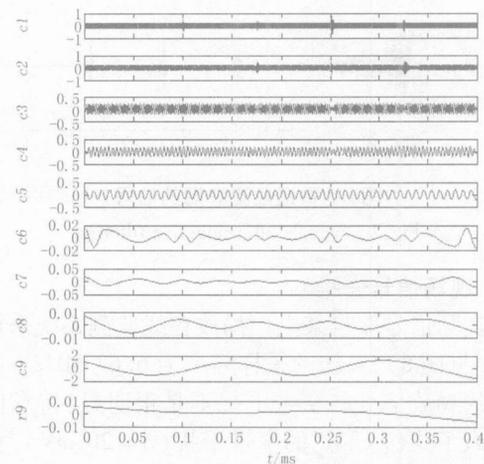


图 4 仿真信号的 EMD 分解结果

Fig 4 MFs after decomposition of simulation signals

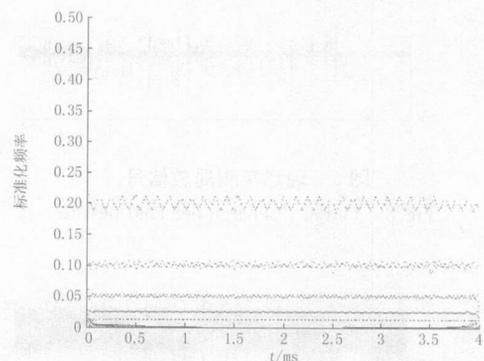


图 5 仿真信号的 Hilbert-Huang 谱

Fig 5 HH spectrum of the simulation signals

根据图2所示的处理流程,再对图4中分解得到的固有模态函数进行自适应滤波,显然,此时的滤波处理不再是针对多频率的窄带干扰了,而是针对单频率的窄带干扰。对滤波后的结果进行重构,就可以得到对滤除抑制窄带干扰后的结果,如图6所

示。

采用普通自适应滤波算法处理后的结果见图 7。对比图 6、7 和原始信号图 3(a) 可知, 本文的算法能取得优于普通自适应滤波的效果。这种优势在普通自适应滤波算法结果发散时显得尤为明显。

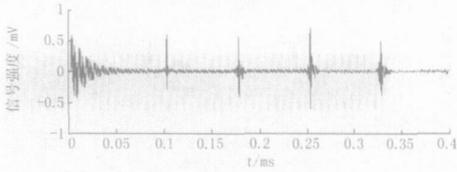


图 6 新算法滤波后的信号

Fig 6 Signals after filtering by the new algorithm

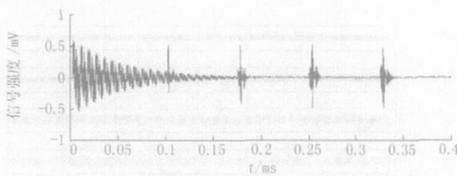


图 7 自适应滤波后的信号

Fig 7 Signals after adaptive filtering

3.2 现场信号去噪

实际信号取自某电厂局放在线监测系统采得的数据(见图 8), 系统的采样频率为 6.67 MHz 。由于采得的局放信号的窄带干扰不是很明显, 特意向其中加入了式(7)形式的窄带干扰 ($A = 20 \text{ mV}$), 如图 9 所示, 许多小的局放信号都湮没在了窄带干扰之中。

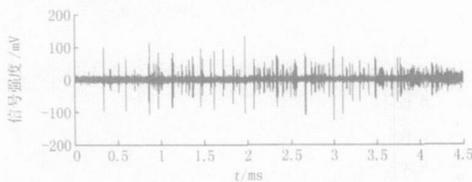


图 8 现场实测局放信号

Fig 8 Partial discharge detected on-site

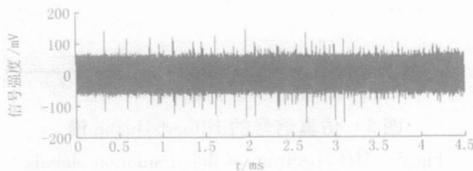


图 9 加入窄带干扰后的信号

Fig 9 Partial discharge plus DSI

对比图 10 和图 11, 可以看到, 新算法抑制窄带的效果要好于普通自适应滤波的效果。例如, 在时间段 $4 \sim 4.5 \text{ ms}$ 之间, 普通自适应滤波处理造成脉

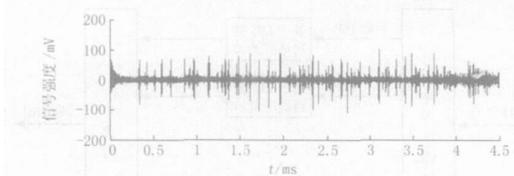


图 10 新算法滤波后的信号

Fig 10 Signals after filtering by the new algorithm

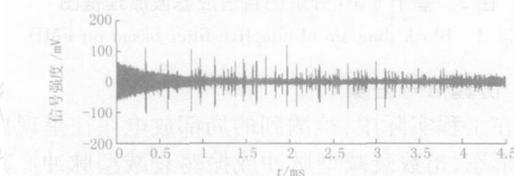


图 11 自适应滤波后的信号

Fig 11 Signals after adaptive filtering

冲幅值衰减较大, 而新算法则能有效地保持局放的幅值; 再如, 在时间段 $0 \sim 1 \text{ ms}$ 之间, 普通自适应滤波的处理效果很差, 还存在明显的窄带干扰, 但是新算法却能有效地剔除干扰信号, 收敛性能明显优于普通的自适应滤波算法。

4 结论及展望

EMD 是近年来出现的一种新的非平稳信号分析方法, 可以根据信号的物理构成自适应地对信号进行分频分解。本文将它和自适应滤波结合起来, 用以解决多频率窄带干扰抑制时滤波器参数设置困难的问题。

仿真及实际信号的处理表明, 基于 EMD 的自适应滤波算法可以有效地将多频率窄带干扰抑制的问题转化为多个单频率窄带干扰的问题。有效地解决了复杂的自适应滤波器参数设置的问题, 并能取得良好的效果。

参考文献:

- [1] 黄成军. 基于小波理论的大型汽轮发电机局部放电在线监测系统的研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2000.
HUANG Cheng-jun Study of Partial Discharge On-line Monitoring System for Large Turbine Generators Based on Wavelet Analysis [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2000.
- [2] Satish L, Nazneen B. Wavelet-based Denoising of Partial Discharge Signals Buried in Excessive Noise and Interference [J]. IEEE Trans on Electronics and Electrical Insulation, 2003, 10(2): 354-367.
- [3] Huang N E, et al The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-stationary

Time Series Analysis [J]. Proc R Soc Lond A, 1998: 903-995.

[4] Flandrin P, Goncalves P. Empirical Mode Decompositions as Data-driven Wavelet-like Expansions [J]. International Journal of Wavelets, Multiresolution and Information Processing, 2004, 2(4): 477-496

[5] Hayes M H. Statistical Digital Signal Processing and Modeling [M]. John Wiley and Sons, Inc, 1996

[6] 徐剑, 黄成军, 邵震宇, 等. 基于小波集合的局部放电信息提取算法 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(16): 36-40

XU Jian, HUANG Cheng-jun, SHAO Zhen-yu, et al Research on a Wavelet-based Algorithm for Extracting PD

Cluster of Diversiform Features [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(16): 36-40.

收稿日期: 2006-05-31; 修回日期: 2006-06-22

作者简介:

钱勇(1977-),男,博士研究生,研究方向为大型电气设备在线监测和故障诊断; E-mail: qian_yong@sjtu.edu.cn

黄成军(1970-),男,博士,副教授,研究方向为大型电气设备在线监测和故障诊断技术;

戚伟(1983-),女,硕士研究生,研究方向为嵌入式系统在在线监测系统中的应用。

Application of adaptive filtering algorithm

based on empirical mode decomposition to suppress DSI in PD detection

QIAN Yong, HUANG Cheng-jun, QI Wei

(Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Adaptive filter is an effective method for suppressing Discrete Spectrum Interference (DSI). For DSI with single frequency, it is easy to set the parameters of the filter. However, it will become difficult when faces with DSI of multi-frequency, which often occurs in partial discharge monitoring systems. Based on the frequency splitting characteristics of Empirical Mode Decomposition (EMD), this paper incorporates it into the adaptive filtering algorithm and a novel algorithm was proposed. After EMD of the noisy signals, DSIs of different main frequency could be decomposed into different Intrinsic Mode Functions (IMF), and then multi-frequency DSI would turn to some single-frequency DSIs. Based on this transformation, problems about settings of adaptive filter can be solved. Results obtained from simulation signals and on-site data confirm its validity.

Key words: empirical mode decomposition; intrinsic mode function; adaptive filter; partial discharge; discrete spectrum interference

(上接第 11 页 continued from page 11)

[6] Newland D E. Harmonic Wavelet Analysis [J]. Proceedings of the Royal Society of London: A, 1993, 443(10): 203-225.

[7] 常鲜戎, 樊尚, 科康波, 等. 三相异步电机新模型及其仿真与实验 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 140-145.

CHANG Xian-rong, FAN Shang, Cocquemot V, et al The New Three Phase Asynchronous Machine Model and Simulation Experiment [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 140-145.

[8] 徐小来, 王莉, 谢一静. 基于 MATLAB 的异步电动机定

子绕组故障仿真 [J]. 电气应用, 2005, (9): 23-24, 45.

XU Xiao-lai, WANG Li, XIE Yi-jing. Simulating on Stator Winding Fault of A synchronous Motor Based on Matlab [J]. Electro Technical Application, 2005, (9): 23-24, 45.

收稿日期: 2006-05-24

作者简介:

王莉(1958-),女,教授,博士研究生,主要研究方向为电力系统及其自动化、故障诊断。E-mail: kjgcdxw1@sina.com

The rotor bar broken fault diagnosis of an asynchronous motor based on harmonic wavelet

WANG Li, WANG Run-xiao

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: When a fault of the rotor bar of an frequency converter has taken place, the characteristic signal components of the currents will be added into the stator current. In this paper, the transform of the harmonic wavelet method is applied to detect the characteristic signal components of the rotor bar broken fault. The result shows that not only it can be used to detect the characteristic signal of the rotor bar broken fault with great sensitivity but also be used to evaluate the severity of the fault.

Key words: harmonic wavelet; fault diagnosis; frequency converter; rotor bar broken