

开关柜局部放电超高频检测中周期性窄带干扰的抑制研究与应用

李建明¹, 罗高², 王惠波³

(1 四川电力科学研究院 四川 成都 610072; 2. 西华大学电气信息学院 四川 成都 610039;
3. 广安电业局 四川 广安 638000)

摘要:基于小波变换用于抑制开关柜局部放电在线检测中周期性窄带干扰的目的,提出了 K -均值阈值算法来改进经典阈值法对窄带干扰频率的自适应性,现场实验结果表明, K -均值阈值算法能改善局部放电信号的提取效果,准确率高,波形失真小,对混频周期性窄带干扰具有较强抑制能力。

关键词:小波变换; 周期性窄带干扰; K -均值; 开关柜; 局部放电

Abstract: For purpose of suppressing the periodic narrow-band interference during on-line monitoring of partial discharge (PD) in switchgear based on wavelet transform, K -means threshold algorithm is proposed to improve the self-adaptive of classic threshold for narrow-band interference frequency. The field experiments show that the proposed method can improve the extraction of partial discharge signal with a strong suppression of frequency-mixing periodic narrow-band interference, which has a high accuracy and small waveform distortion.

Key words: wavelet transform; periodic narrow-band interference; K -means algorithm; switchgear; partial discharge

中图分类号: TM855 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2011)06-0046-04

0 引言

局部放电的过程,除产生电荷的转移和电能的损耗,也产生声、光、热及其他生成物等,可能会引起开关柜相间短路,甚至爆炸,严重危及人身安全,影响供电可靠性。对高压开关柜进行绝缘性能检测与故障诊断,是实现设备状态检修的前提,保证设备安全可靠运行的关键。电力设备的多数故障是绝缘性故障,电应力作用引起绝缘劣化。导致绝缘故障,在机械力、热和电场的共同作用下,最终也会发展为绝缘性故障。据统计,由于开关柜绝缘劣化引起事故的台次占开关总事故台次的68%和事故总容量的74%。为克服预防性检修体系的局限性,减少停电并降低维修费用,可应用高压开关柜绝缘性能检测与故障诊断技术,对运行中的高压开关柜的绝缘状况进行连续的状态检测,实时获得能反映绝缘状况变化的信息。在进行分析处理后,对设备的绝缘状况做出诊断,并根据诊断的结论安排必要的检修,并且开关柜在线监测的应用能同时节省人力物力,为将来可能发展的事故分析提供了有力的数据。开展开关柜局部放电在线监

测在电力系统中具有十分重要的作用和意义。

局部放电监测中的干扰主要是经测量点的传感器随局部放电(partial discharge, PD)信号一起进入监测系统的。按时域信号特征可分为连续的窄带周期性干扰、脉冲干扰和白噪声3类。在实际的测量中,局部放电的放电量通常都很微小,而现场噪声干扰太大,以至很难获取真正的局部放电信号。有效地削弱和抑制干扰是提高局部放电检测装置检测效果的重要保证,目前虽然有许多抗干扰方法已在实际中应用,但还是有许多干扰无法消除,不能有效地检测局部放电,难以保障监测系统的可靠性。

传统的基于傅里叶变换的滤波方法有其局限性:因这种变换难以获得信号的局部特性,对放电这样的非平稳突变信号,较难获得理想结果,自适应滤波器能自动调节参数,但其稳定性较差,小波变换的尺度伸缩性能局部化地分析信号的特征,其窄时窗反映信号的高频成分,能捕捉到非平稳的奇异瞬变信号,并将其放大,小波变换分析是一种新的时频分析方法^[1],它在时域和频域同时具有良好的局部性,特别适合处理非平稳信号,这里提出了基于小波变换用于抑制开关柜局部放电在线检测中周期性窄带干扰,提

出了 K - 均值阈值算法来改进经典阈值法对窄带干扰频率的自适应性,通过对小波变换原理及其合理选择阈值的目标函数的建立,通过计算机模拟仿真和现场实验结果表明, K - 均值阈值算法改善局部放电信号的提取效果,准确率高,波形失真小,对混频周期性窄带干扰具有较强抑制能力。

1 小波变换原理及仿真

1.1 小波变换原理

设 $\Psi(t)$ 为一复变函数,其傅里叶变换满足

$$C_p = \int_0^{+\infty} |\hat{\Psi}(\omega)|^2 \frac{d\omega}{\omega} < \infty \quad (1)$$

则称 $\Psi(t)$ 为一个小波,设 a 为伸缩因子, b 为平移因子,则 $\Psi(t)$ 可通过平移伸缩成一簇函数: $\Psi_{a,b}(t)$ 为

$$\Psi_{a,b}(t) = |a|^{-\frac{1}{2}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right); b, a \in R, a \neq 0 \quad (2)$$

因此称 $\Psi(t)$ 为基小波或母小波,而称 $\Psi_{a,b}(t)$ 为子波或连续小波。信号 $f(t)$ 的小波变换定义为

$$W_f(a,b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \overline{\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (3)$$

式中 $\overline{\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)}$ 是 $\Psi_{a,b}(t)$ 的复共轭,这样在时域和频域具有良好的局部化性质,实际中通常需要把基小波及其变换离散化,令 $a = 2^m, b = na, m, n$ 令为正整数,即 $m, n \in Z^+$ 。信号 $f(t)$ 经离散二进制变换可写为

$$C_{mn} = 2^{-\frac{m}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(2^{-m}t - n) f(t) dt \quad (4)$$

设 $\{V_j\}$ 是一给定的多分辨分析, φ 和 Ψ 分别是相应的尺函数和小波函数。根据 Mallat 塔式算法思想,信号的离散二进制小波分解过程见图 1。

$$S_1^d f \begin{cases} \angle \\ \angle \end{cases} \begin{matrix} S_{2^j}^d f \cdots \\ W_{2^j}^d f \cdots \end{matrix} \begin{cases} \angle \\ \angle \end{matrix} \begin{matrix} S_2^d f \\ W_2^d f \end{matrix}$$

图 1 中: $S_1^d = \{f^* \varphi(n)\}, n \in Z$ 即为原信号, H, G 为二进小波相应的低通滤波器和高通滤波器的脉冲响应函数。 $W_{2^j}^d (j=1, 2, 3, \dots)$ 为不同尺度下的平滑分量。则其间的算法关系为

$$S_{2^j}^d f = S_{2^{j-1}}^d f^* H, W_{2^j}^d f = W_{2^{j-1}}^d f^* G \quad (5)$$

同理可得信号的重构算法为

$$S_{2^j-1}^d f = S_{2^j}^d f^* H + W_{2^j}^d f^* G^* \quad (6)$$

其中 H^*, G^* 为 H, G 为的对偶算子式。

1.2 目标函数的确立

窄带干扰的频率发生变化时,干扰功率峰在小波功率谱曲线上的位置也会发生变化;且当窄带干扰的信号强度发生变化时,干扰峰的幅值也会有所不同。这就要求小波阈值能够自适应地针对窄带干扰信号变化。由于窄带干扰形成的干扰峰,在大尺度下的幅值比小尺度下的大,粗略信号部分峰值比细节信号部分的幅值大,窄带干扰的小波功率谱特性分析了窄带干扰对 PD 信号的小波功率谱的统计特性^[7],也就是根据此特性得到启示,提出一种结合 K - 均值算法^[2]的 K - 均值阈值法,它是对经典阈值法的改进。

K - 均值算法用于对数据点进行聚类划分,它根据最终分类个数 K 随机选取 K 个初始聚类中心,不断进行迭代,直到达到目标函数的最小值,以得到最终的聚类结果。其中,目标函数通常采用平方误差准则^[4],即

$$E = \sum_{i=1}^k \sum_{p \in C_i} |p - m_i|^2 \quad (7)$$

式中 E 所有聚类对象的平方误差和; p 为聚类对象; m_i 为类 C_i 的各聚类对象(样本)平均值,即

$$m_i = \sum_{p \in C_i} p / |C_i| \quad (8)$$

式中, $|C_i|$ 为类 C_i 的聚类对象的数目。

K - 均值聚类算法的一般步骤如下。

(1) 初始化。输入数据集 N , 输入指定聚类类数 K , 并在 N 中随机选取 K 个对象作为初始聚类中心 $E = E_{before} = 0, m_i = \sum_{p \in C_i} p / |C_i|, E_{before} = E$ 。设定迭代中止条件,比如最大循环次数或者聚类中心收敛误差容限 $|E - E_{before}| < \varepsilon$ 。

(2) 进行迭代。根据相似度准则将数据对象分配到最近的聚类中心,分别计算类 i 的第 j 个聚类对象 $p(i,j)$ 与各类的样本均值的距离 $|p(i,j) - m_i|$, 若 $\min(|p(i,j)|) = |p(i,j) - m_u|$, 则 $p(i,j)$ 分配到类 u 中,从而形成一类。

(3) 更新聚类中心。然后以每一类的平均向量作为新的聚类中心,重新分配数据对象。

(4) 反复执行第二步和第三步直至满足中止条件。

这种先利用 K - 均值算法对数据点进行一次预筛选^[3],然后仅根据其中的一部分数据点(即含噪声水平较低的一部分数据点)取阈值的改进阈值法称为 K - 均值阈值法。

这里采用与 PD 信号特征极为相似的 db4 进行

去噪分解,分解层数为3层,其分解示意图1所示。根据信号重构原理,只需要研究节点H1、H2、H3、L3。

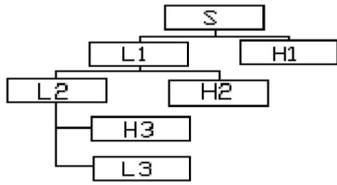


图1 小波分解示意图

利用改进后的K-均值算法对数据集进行聚类划分,其聚类划分结果如表1所示。

表1 K-均值数据集聚类划分结果

节点	A类		B类		C类	
	数据点数量	平均值	数据点数量	平均值	数据点数量	平均值
H1	8	12.4	208	3.6	1 790	0.5
H2	4	1 561.9	4	128.2	1 002	1.3
H3	4	5 181.4	8	1 009	500	11.3
L3	16	7 802.8	28	583.6	468	19.4

从表1可以看出,运用K-均值算法将数据集进行聚类划分结果也符合上面提出的窄带干扰形成的干扰峰,在大尺度下的幅值比小尺度下的大,粗略信号部分峰值比细节信号部分的幅值大的重要特征。

1.3 模拟信号仿真及分析

实际PD信号既可能存在窄带干扰,还可能可能存在白噪声和脉冲干扰。由于难以获得纯净的PD信号,在分析窄带干扰的小波功率谱特性时,采用仿真PD信号进行理论研究。如图2、图3所示(N为采样点数)图中从左至右5个仿真PD信号源依次为高斯脉冲、单指数衰减脉冲、双指数衰减脉冲、单指数衰减振荡脉冲、双指数衰减振荡脉冲。脉冲信号的最大幅值S均为标么值1,然后叠加上多个不同频率的混合周期信号,以模拟复杂的混频窄带干扰,干扰信号频率设为50、60、60、550、900 MHz,幅值做归一化处理,其峰值的标么值为1,并对其分别采用了傅里叶变换,自适应滤波去噪仿真和所采用的K-均值阈值去噪,图4、5为模拟一指数衰减信号污染周期窄带干扰信号及分别采用傅里叶变换去噪和自适应滤波去噪和K-均值阈值去噪,仿真效果图2、3所示。

从图2和图3仿真结果可以看出,傅里叶变换虽然能一定程度上去噪,但是不能从被干扰淹没的有噪信号中提取局部放电信号,所以傅里叶变换的滤波方法在局部放电信号去噪中有其局限性:因这种变换难以获得信号的局部特性,对放电这样的非平稳突变信

号,较难获得理想结果,自适应滤波器能自动调节参数,在去噪处理和提出局部放电信号方面的能力虽然都较傅里叶变换去噪更好,但是稳定性较差,这在局部放电监测中有可能引起误判,通过仿真比较,K-均值阈值算法改善局部放电信号的提取效果,准确率高,波形失真小,对混频周期性窄带干扰具有较强抑制能力。

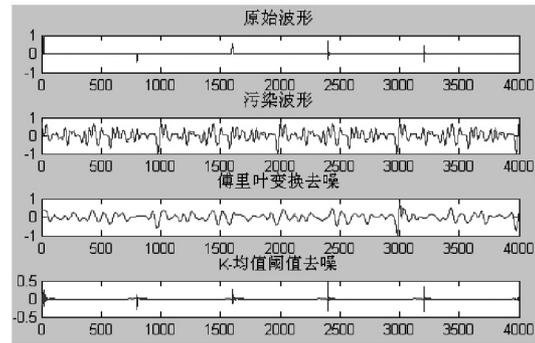


图2 K-均值傅里叶变换在350 MHz和400 MHz混合干扰下去噪效果对比

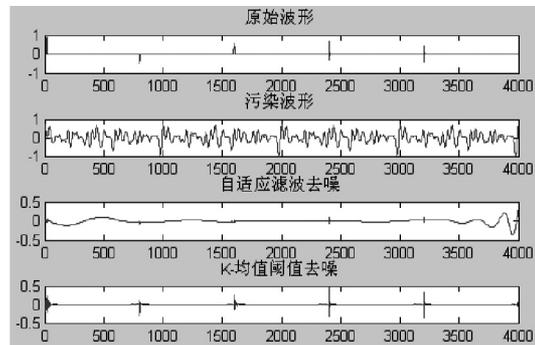


图3 K-均值自适应滤波在350 MHz和400 MHz混合干扰下去噪效果对比图

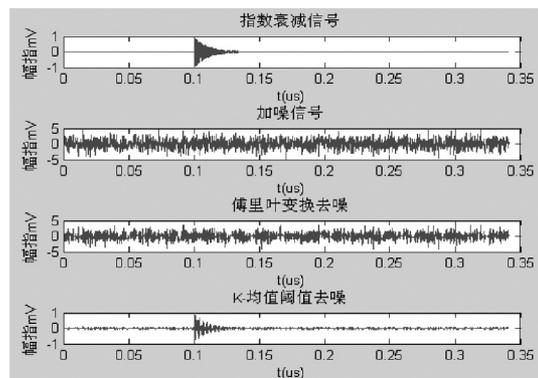


图4 K-均值傅里叶变换在550 MHz和600 MHz混合干扰下去噪效果对比

通过图4、图5仿真可以看出,K-均值阈值算法改善局部放电信号的提取效果,准确率高,波形失真小,对混频周期性窄带干扰具有较强抑制能力。

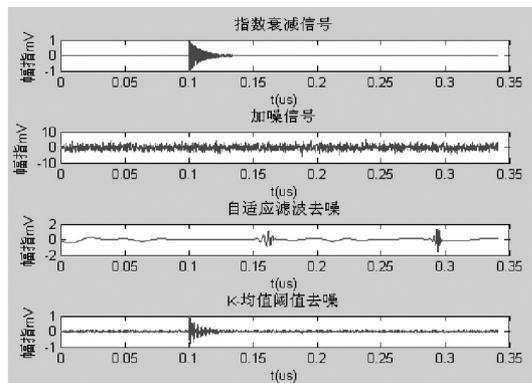


图5 K-均值自适应滤波在550 MHz和600 MHz混合干扰下去噪效果对比

2 小波变换在开关柜局部放电在线检测中的应用

为检验对含有混频窄带干扰的实测PD信号的去噪能力,在对四川某水电厂一开关柜进行电晕放电模拟试验。现场测试采用超高频检测法,测试设备为外置环天线,传感器、示波器为力科 Wavepro7 100 (带宽1 GHz,最大采样率20 GS/s,采样点数为20 000,存储深度为双48 MB)。现场接线见图6,模拟电晕放电见图7。



图6 现场试验接线图

试验所采用的超频检测装置报警阈值频率设为300 MHz,超高频检测传感器放在开关柜内。

现场采用的方式是在开关柜某相母线上挂一细铜丝产生电晕放电,试验时将升压变压器从零逐渐加压,当所加电压较低时,超高频检测装置不报警,随着电压增加,超高频检测装置开始报警,并且细铜丝尖端附近伴随着可见的紫外光,随着电压进一步的升高,紫外光更加明显,当超高频检测装置开始报警的同时,超高频检测装置将超高频信号开始采样并且储存起来,试验的另一个步骤是当所加电压一定时,通过改变铜丝端部对地的距离检测超高频信号,当电压

一定时,距离较大时,超高频检测装置不报警,随着距离进一步减小,超高频检测装置开始出现报警,并且在靠近铜丝端部的母线附近开始出现微弱的紫外光。下面通过对超高频检测装置所采集的两组电晕放电信号(频率为550 MHz左右)进行去噪处理,以验证提出的K-均值阈值去噪的效果。

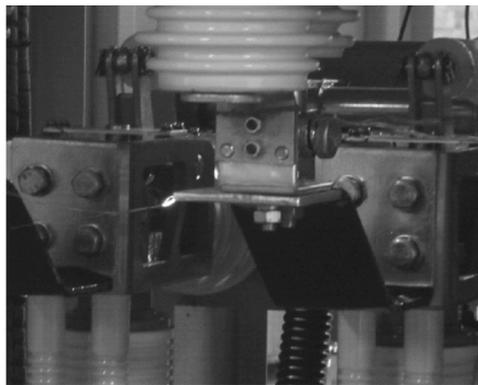


图7 现场模拟电晕放电

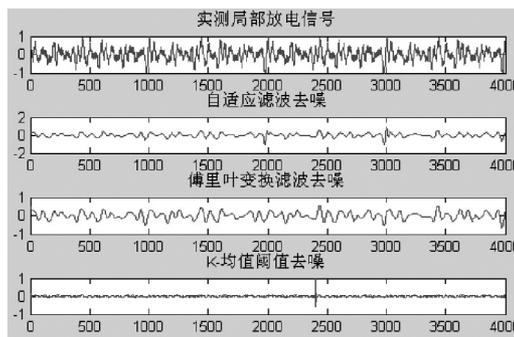


图8 多种方法对一实测信号去噪效果对比

当铜丝和母线的距离一定时,随着试验变压器逐步加压,超高频检测装置开始出现报警,这说明电晕放电伴随着超高频信号,当所加电压一定时,随着铜丝端部和母线的距离减少到一定程度时,超高频检测装置出现报警,这说明电晕放电伴随着超高频信号,通过对超高频检测装置所采集的局部放电信号再现,从图8可以看出,所采集超高频信号几乎被周围的噪声所淹没,不能有效地观察超高频信号,但是通过所提出的K-均值阈值算法进行去噪处理,可以将局部放电信号提取出来,并且对周期性窄带干扰信号有了很大的抑制效果。

通过图8所示,对现场局部放电采样数据进行去噪分析,傅里叶变换和自适应滤波在局部放电周期性窄带干扰抑制方面的能力有明显的局限性,不能有效去噪和提出局部放电信号,而K-均值阈值方法能有效地从被周期性窄带干扰淹没中提出局部放电信号, (下转第66页)

现场的需求开发了一套数据管理系统,总的说来做了如下工作:①论述了超高频法的应用优点,它在变压器局部放电的监测中有着较强的抗干扰能力;②利用 delphi 开发了数据管理系统,同时利用 SQLserver 建立了后台运行的数据库系统;③通过现场的应用,取得了较好的成果。

参考文献

[1] 成永红. 电力设备绝缘检测与诊断[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.

[2] [苏]r. C. 库钦斯基著,徐永禧,胡维新译. 高压电气设备局部放电(第1版)[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984.

[3] 葛景滂,邱昌容主编. 局部放电测量(第1版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 1984.

[4] 邱昌容,王乃庆主编. 电工设备局部放电及测试技术(第1版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.

[5] 朱德恒,谈克雄主编. 电绝缘诊断技术(第1版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.

[6] 吴广宁主编. 高电压技术(第1版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.

[7] 吴玉鹏,陈丽娟,王鹏等. 2002年全国电力可靠性分析[J]. 中国电力, 2003, 36(5): 1-7.

[8] 陈庆国. 变压器局部放电特高频检测及干扰抑制算法的研究[D]. 北京: 清华大学, 2003.

[9] [苏]r. C. 库钦斯基著,徐永禧,胡维新译. 高压电气设备局部放电(第1版)[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984年.

[10] 王颂,李香龙,李军浩等. 变压器局部放电超高频信号外传播特性的试验研究[J]. 高压电器, 2007, 43(2): 100-102.

[11] 王国利,郝艳棒,李彦明. 光纤技术在电力变压器绝缘监测中的应用[J]. 高压电器, 2001, 37(2): 32-35.

(收稿日期:2011-10-08)

(上接第49页)

并且对干扰有较强的抑制能力。

3 结 论

(1) 通过对模拟信号仿真和现场采集的局部放电信号去噪仿真都可以看出,传统的基于傅里叶变换的滤波方法有其局限性:因这种变换难以获得信号的局部特性,对放电这样的非平稳突变信号,较难获得理想结果,自适应滤波器能自动调节参数,但其稳定性较差,所采用的K-均值阈值方法能有效地从被周期性窄带干扰淹没中提出局部放电信号,准确率高,波形失真小,并且对干扰有较强的抑制能力。证实了K-均值阈值方法在局部放电信号提取和噪声抑制的能力方面有较高的准确性和有效性。

(2) 窄带干扰形成的干扰峰,在大尺度下的幅值比小尺度下的大,粗略信号部分峰值比细节信号部分的幅值大,窄带干扰会呈现强烈的干扰峰,而PD信号在整个频域呈均匀分布,该重要特征是所采用K-均值阈值算法抑制干扰的重要依据。

(3) K-均值阈值法首先将采样数据进行聚类划分,对含噪信号进行初次筛选,再对筛选的信号数据选择合适的阈值进行去噪,有效地提高了去噪效果,增强了经典阈值法对窄带干扰频率的自适应性。

参考文献

[1] 许高峰,孙才新,唐炬等. 基于小波变换抑制GIS局部放电检测中白噪干扰的新方法[J]. 电工技术学报, 2003, 18(2): 87-90.

[2] 王国利,郑毅,郝艳棒等. 用于变压器局部放电检测的超高频传感器的初步研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(4): 154-160.

[3] 司文荣,李军浩,袁鹏等. 气体绝缘组合电器局部放电电源的检测与识别[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(16): 119-126.

[4] 徐淑珍,朱子述,秦松林等. 局部放电在线检测中周期性干扰的抑制[J]. 高电压技术, 2001, 27(1): 32-34.

[5] 王晓霞,孙书星,马殿光. 局部放电在线监测信号中周期性脉冲干扰的抑制[J]. 变压器, 2002, 39(Z1): 36-38.

[6] 王国利,郝艳棒,袁鹏等. 变压器局部放电超高频检测中的混频技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 39(S1): 36-38.

[7] 朱根良. 浅议中压开关柜事故调查中的故障分析[J]. 高压电器, 2002, 24(10): 115-120.

[8] 杜彦明,顾霓鸿. 中国电力系统配电开关设备现状及事故情况[J]. 高压电器, 2001, 25(11): 60-65.

作者简介:

李建明(1952),男,教授级高工,高电压与绝缘技术专家,四川电力科学研究院副总工程师。

(收稿日期:2011-09-28)