

基于小波变换和数学形态学的 局部放电信号分析方法

李天云, 杨梅, 周喜超, 程思勇

(东北电力大学 电气工程学院, 吉林省 吉林市 132012)

Method of Partial Discharge Signal Analysis Based on Wavelet Transform and Mathematical Morphology

LI Tian-yun, YANG Mei, ZHOU Xi-chao, CHENG Si-yong

(School of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, Jilin Province, China)

ABSTRACT: To denoise the partial discharge signal containing intensive noise, a new method that interfuses wavelet transform with mathematical morphology is used and compared with the threshold method based on wavelet transform. It is found that the presented method can efficiently eliminate the noise existing in partial discharge signal and the characteristics of the original signal can be well retained. The pattern spectrums of partial discharge signals after noise reduction are extracted by multi-scale open operation of mathematical morphology, from this it is observed that each type of discharge possesses its own pattern characteristic, this conclusion can be applied in the identification of the type of discharge.

KEY WORDS: wavelet transform; mathematical morphology; partial discharge; pattern spectrum; high voltage and insulation technology

摘要:应用小波变换与数学形态学相融合的方法对含有强噪声的局部放电信号进行消噪,并与小波变换的阈值法进行了比较,发现该方法能更有效地消除局部放电信号的噪声,同时能很好地保留原信号特征。采用多尺度数学形态学开运算提取消噪后的局部放电信号数学形态谱,通过形态谱的提取可看出每种放电类型具有不同的形态特征,为放电类型的识别打下基础。

关键词:小波变换;数学形态学;局部放电;形态谱;高压与绝缘技术

0 引言

局部放电信号的检测^[1]是反映电气设备绝缘状况的重要手段,真实、有效地提取局部放电信号,识别放电类型具有重要意义。设备运行现场存在各种干扰信号,给局部放电信号的提取带来了很大的

困难。对于这些干扰,目前一般采用基于傅里叶变换的数字陷波器法^[2]或者硬件滤波法处理。这些方法虽然能在一定程度上抑制干扰,但原始局部放电信号能量损失较大,且当出现新干扰或者干扰的中心频率发生变化时,原有的参数设置就会失效。小波变换在局部放电信号的提取中具有很好的效果^[3-4],其中小波变换的阈值方法简单、应用广泛^[4],但该方法会使消噪后的信号损失部分能量,会使信号有所失真。

本文提出了小波变换与数学形态学相融合的方法来提取局部放电信号。首先对信号进行小波分解,经过数学形态学进行消噪,小阈值处理,提高消噪能力的同时尽可能多地保留信号的形态特征。应用数学的开运算对发电机的3种消噪后的局部放电信号提取形态谱,通过形态谱的提取可以看出形态谱完全能够表现出信号的形态特性,为以后的类型识别提供特征向量。

1 小波变换阈值消噪方法

小波变换^[5]具有多分辨率分析的特点,在时、频域内均具有良好的局部化特性,同时能改变频率分辨率和时间分辨率,因此小波变换被誉为分析信号的数学显微镜。局部放电信号的能量在小波域内主要集中在有限的几组系数中,经过小波变换模极大值随尺度增加而增加;干扰信号的能量却分布于整个小波域内,经小波变换模极大值随尺度增加而减少。于是可找到一个合适的数值作为阈值,当小波变换的系数小于该阈值时,即认为此时的小波变换系数主要由噪声引起,并置为零;当小波变换的系

数大于该阈值时,即认为此时的系数主要由信号引起,因此将这一部分的系数按照软阈值方法或硬阈值方法给予保留。

可采用式(1)的算法选取对应各层分量的阈值^[5]

$$\lambda_j = \frac{m_j}{0.6745} \cdot \sqrt{2 \lg(n_j)} \quad (1)$$

式中: m_j 为尺度 j 上系数中值; n_j 为尺度 j 上的系数总数量。

软阈值方法是将信号绝对值大于阈值的点转换为该点值与阈值的差值,该方法可获得较好的平滑消噪信号;硬阈值方法是将信号绝对值大于阈值的点直接予以保留,该方法有时会使重构后所得的信号产生一些振荡,因此本文采用软阈值方法。

2 数学形态学原理

2.1 基本运算

数学形态学^[6-11]的基本思想是在考察信号时设计一种收集信号信息的“探针”,称为结构元素(相当于滤波窗),在信号中不断移动结构元素,便可提取有用的信息做特征分析和描述,达到提取信号、保持细节和抑制噪声的目的。形态变换一般分为二值形态变换和多值形态变换,多值形态变换也称灰度变换。由于局部放电在线监测的信号是一维信号,本文只介绍一维离散情况下的多值形态变换,包括腐蚀、膨胀、形态开和形态闭。

假设输入序列 $f(n)$ 是定义在 $\{0, 1, \dots, N-1\}$ 上的离散函数,而结构元素 $g(n)$ 为定义在 $\{0, 1, \dots, M-1\}$ 上的离散函数,且 $N \geq M$, N, M 分别为其长度,则 $f(n)$ 关于 $g(n)$ 的腐蚀(erosion)和膨胀(dilation)分别定义为

$$(f \ominus g)(n) = \min[f(n+m) - g(m)] \quad (2)$$

$$(m \in 0, 1, 2, \dots, M-1)$$

$$(f \oplus g)(n) = \max[f(n-m) + g(m)] \quad (3)$$

$$(m \in 0, 1, 2, \dots, M-1)$$

由式(2)、(3)可得 $f(n)$ 关于 $g(n)$ 的开运算和闭运算分别为

$$(f \circ g)(n) = (f \ominus g \oplus g)(n) \quad (4)$$

$$(f \cdot g)(n) = (f \oplus g \ominus g)(n) \quad (5)$$

数学形态学的开运算可用于滤除信号上方的峰值噪声,去除信号边缘的毛刺、孤立斑点及小桥结构;闭运算可用于平滑或抑制信号下方的波谷噪声,填补信号的漏洞和裂缝。因此基于形态学的开、闭运算可构造开-闭滤波器、闭-开滤波器、混合滤

波器和交替混合滤波器。通常开-闭滤波器和闭-开滤波器虽然可同时滤除信号的正负脉冲噪声,但存在着统计偏移现象。这是因为开运算的收缩性导致开-闭滤波器输出幅度较小,而闭运算的扩张性导致闭-开滤波器输出幅度较大。为解决信号输出的偏移现象,一般选用混合滤波器和交替混合滤波器。

2.2 多尺度形态学

假设形态运算为 $F(f)$, 基于 F 的多尺度运算 F_λ 定义为^[6]

$$F_\lambda(f) = \lambda[F(f_\lambda(x)/\lambda)]_{1/\lambda} \quad (6)$$

式中: 结构元素 $g(x)$ 经过尺度 I 伸缩后作用于 $f(x)$ 得到 $f_\lambda(x)$; $\lambda(\lambda > 0)$ 为 $F_\lambda(f)$ 的尺度。

由式(6)可推导出多尺度腐蚀、膨胀、开运算和闭运算的定义为

$$(f \ominus g)_\lambda = f \ominus \lambda g_{1/\lambda} \quad (7)$$

$$(f \oplus g)_\lambda = f \oplus \lambda g_{1/\lambda} \quad (8)$$

$$(f \circ g)_\lambda = f \circ \lambda g_{1/\lambda} \quad (9)$$

$$(f \cdot g)_\lambda = f \cdot \lambda g_{1/\lambda} \quad (10)$$

通常,结构函数为凸函数时,随着 λ 的增大, $F_\lambda(f)$ 会使图象的形态越来越简单。

2.3 形态谱

形态谱^[12-14]也称形态形状量值直方图,是图象分析中表示形状的重要方法,可用于图象中物体形状描述、形状特征提取和形状识别等。令 $f(x)$ 在 $(x \in \mathbf{R}^m, m=1, 2, \dots, M-1)$ 为一非负函数, $g(x)$ 为一凸的结构函数。 $f(x)$ 的形态谱定义为^[13]

$$S(f, g, \lambda) = \begin{cases} -\frac{dA(f \circ \lambda g)}{d\lambda}, & (\lambda \geq 0) \\ -\frac{dA(f(-\lambda)g)}{d\lambda}, & (\lambda < 0) \end{cases} \quad (11)$$

式中: $A(f) = \int_{\mathbf{R}^m} f(x) dx$ 为在定义域内 $U(f(x))$ 的有限面积; $\lambda \geq 0$ 时, $S(f, g, \lambda)$ 为开运算形态谱, $\lambda < 0$ 时 $S(f, g, \lambda)$ 为闭运算形态谱; $U(f(x))$ 称为函数 $f(x)$ 的本影,定义为

$$U(f) = \{(x, t) | x \in \mathbf{R}^m, t \in \mathbf{R}, t \leq f(x), x \in \text{sup}(f)\} \quad (12)$$

形态谱描述了信号在不同尺度下的变化,能更好地表现信号的形态特征。

2.4 结构元素的选取

形态滤波器的输出既取决于变换的形式,又取决于结构元素的尺寸和形状,一般只有与结构元素

的尺寸和形状相匹配的信号才能被保持。考虑到计算量和电力系统局部放电信号中所含的噪声多样,且具有很大的不确定性,因此基于扁平结构元素(指在其定义域上取常数的结构元素,通常假设该常数为零)的膨胀和腐蚀运算具有取信号的局部极大和局部极小值的功能,对电力系统中复杂多变的信号十分有效,因此选用扁平结构元素能够得到理想的消噪效果。数学形态学选取结构元素时并没有定性的规则,结构元素越长、形状越复杂,计算量就会越大,但经过多次的实验表明,选取小于信号中有用波的最小周期而大于噪声的长度为宜。

3 小波变换与数学形态学融合消噪

3.1 消噪步骤

小波变换的阈值法消噪过程中,有些局部放电信号的小波变换系数值可能与噪声的小波变换系数值相近,有时可能低于阈值被作为噪声去掉,导致信号部分失真。为能更好地保留局部放电信号,结合数学形态学能够有效地消除噪声且能较好地保留原信号的形态特征的特点,先对各层系数进行形态运算,然后设置一个较小的阈值,尽可能保留原始信号,具体步骤如下:

- (1) 选择合适的小波基函数和适当的尺度 j ,将含有噪声的局部放电信号 $S(t)$ 进行 N 层小波分解,提取各层的小波系数 $W_T(j,k)$ 。
- (2) 对于各尺度下的小波系数 $W_T(j,k)$,选取适当长度的扁平结构元素,采用交替混合型数学形态学滤波器进行滤波,得到新的小波系数 $W_T^*(j,k)$ 。
- (3) 采用前文选取阈值的方法求得阈值 λ_j ,再将阈值乘以系数 $k(0 < k < 1)$,经过多次实验比较,确定 k ,利用软阈值方法对新的每一层的小波系数 $W_T^*(j,k)$ 进行阈值处理。
- (4) 重构第(3)步处理后的小波系数 $W_T^0(j,k)$,从而可得消噪后的信号。

3.2 仿真及分析

局部放电信号为高频信号,在理论分析中可用式(14)的数学模型来等效^[15]

$$f(t) = A(e^{-1.3(t-t_0)/\tau} - e^{-2.2(t-t_0)/\tau})\sin(f_c \cdot 2\pi(t-t_0)) \quad (13)$$

式中: A 为局部放电信号的幅值; t_0 为局部放电脉冲起始时刻; f_c 为衰减振荡频率; τ 为衰减时间常数。局部放电模型参数如表 1 所示。

连续周期窄带干扰频率为 80 kHz、160 kHz、557 kHz、1.2 MHz,连续周期窄带干扰可等效为

表 1 局部放电模型参数
Tab. 1 Partial discharge model parameters

局部放电	A/mV	$t_0/\mu s$	f_c/kHz	$\tau/\mu s$
信号 1	1	50	200	4
信号 2	1	150	200	2

$$p(t) = A_{(i)} \sum_{i=1}^n \sin(2\pi f_i t) \quad (14)$$

式中: f_i 为干扰的频率; $A_{(i)}$ 为幅值。加入白噪声干扰 $\delta(t)$, 模拟的含噪声的局部放电信号为

$$s(t) = f(t) + p(t) + \delta(t) \quad (15)$$

仿真的采样频率为 4MHz,数据长度为 8×10^4 。为验证本文方法的有效性,定义局放脉冲的波形失真率用均方误差来描述

$$e_{MSE} = \frac{\sum_{i=1}^N |Y(i) - X(i)|^2}{L(Y(i))} \times 100\% \quad (16)$$

式中 $Y(i)$ 与 $X(i)$ 分别为真实的局部放电信号和消噪后的局部放电信号。

图 1(a)为模拟局部放电信号的波形,该信号为衰减振荡信号;图 1(b)为加入各种噪声后的局部放电信号,这些噪声已完全湮没了模拟的局部放电信号,不能辨别是否含有放电信号和具体的放电类型;图 1(c)为采用小波变换和数学形态学相融合的方法提取出的局部放电信号,经过多次实验比较,当阈值前乘的系数 k 取 0.3 时,达到了理想的提取效果,可以看出,该方法具有很强的去噪能力,干扰完全被消除了,同时又尽可能多地保留原始信号的能量,失真很小,实用性很好;图 1(d)为运用相同的小波基函数,在相同条件下运用小波变换阈值法提取的局部放电信号,可以看出,小波变换阈值法对信号有很好的消噪效果,但信号存在失真;图 1(e)为当 k 取 0.3 时,不经过形态学消噪而运用相同的小波基函数,在相同条件下通过小波阈值法直接处理得到的信号,可以看出,得到的局部放电信号虽然已消除了一部分噪声,但与原来含有很强噪声的局部放电信号很相近,还存在很强噪声,根本分辨不出放电信号,说明选取的阈值较小时在小波变换阈值方法中根本不会具有太大的作用,而本文的方法采用数学形态学变换消除了大部分噪声,再经过一个很小的阈值处理,就能很好地保留信号的能量,使信号失真达到最小,同时也展示了数学形态学滤波器在消噪方面具有很好的效果。消噪指标如表 2 所示,可以看出,本文的方法具有很大的优越性,能更好地消除信号中的噪声,失真小,从而明显提高局部

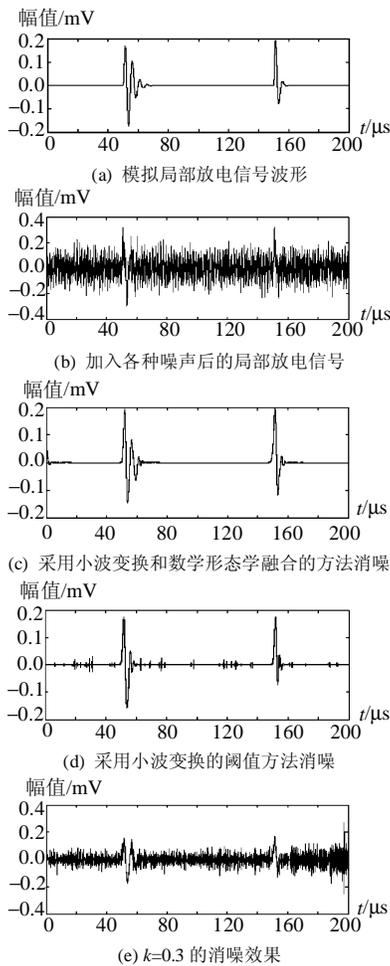


图 1 局部放电信号的提取
Fig. 1 The process of simulated partial discharge detection

表 2 消噪指标

Tab. 2 The denoise index

信号类型	信噪比/dB	ϵ_{MSE}
原局部放电信号	-19.3144	—
小波和数学形态学融合消噪后的信号	6.47360	0.26143
小波消噪后的信号	0.44797	0.42787

放电信号的信噪比。

3.3 现场实测数据分析

图 2(a)为现场提取的含噪声的局部放电信号,数据采样频率为 10 MHz,该信号已被严重干扰,采用小波变换和数学形态学综合滤波的方法处理后得图 2(b),可以看出,该方法能够保留局部放电信号,能够有效消除没用的噪声,具有较高的精度。

4 形态谱的特征提取

由于数学形态学只有加减法和取极大、极小运算,不涉及到乘除法和微分、积分等运算,因此与

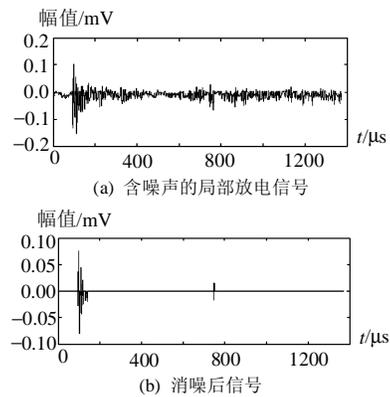


图 2 实测局放信号消噪
Fig. 2 The process of measured partial discharge signal denoising

小波变换相比具有计算简单、快速等优点,且能有效表现信号的形态特征。对消噪后的局部放电信号进行数学形态学开运算的形态谱变换,结果显示通过很少的几个量表现出了不同放电类型有着大不相同的形态特征,为放电类型的识别提供了特征量。本文对现场提取的发电机定子绕组绝缘中存在的 3 大典型局部放电现象(内部放电,端部放电,槽间放电,如图 3 所示)进行形态谱提取。通过数学形态学开运算提取图 3 中波形的形态谱,并进行归一化处理,如图 4 所示。可以看出,不同放电类型的形态谱具有很大的差异,形态谱仅用很少的量即能表现原放电信号的形态特征,且计算简单、快速。

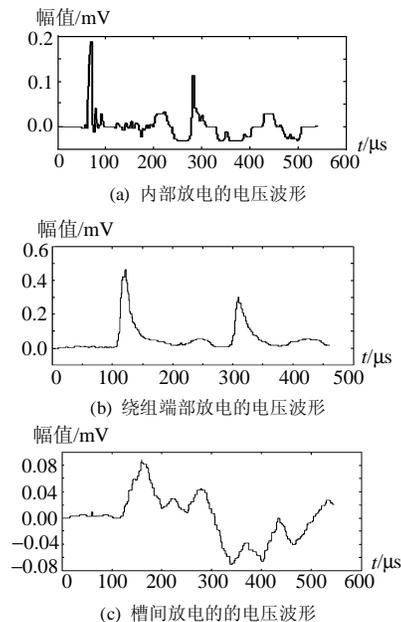


图 3 发电机定子绕组绝缘中的 3 类放电波形
Fig. 3 Three types of the partial discharge signal in generator stator windings

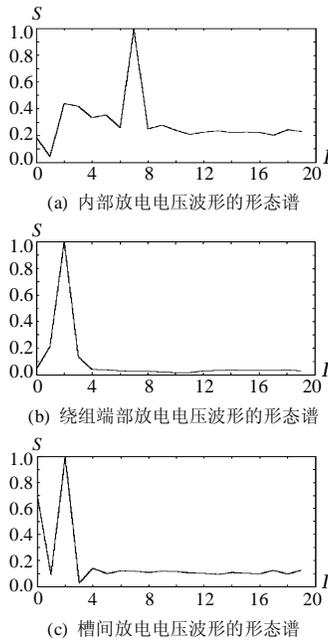


图4 3类局部放电类型的开运算形态谱

Fig. 4 The pattern spectrum of three types of partial discharge signal

5 结论

小波变换与数学形态学相融合的方法对局部放电信号具有很好的消噪能力,并使信号的失真达到最小;但必须选取合适的结构元素和阈值系数,才能达到理想的效果。局部放电信号的形态谱仅用较少的特征量体现了不同放电类型的形态特性,为放电类型的识别提供了特征量。数学形态学在局部放电分析中应用广泛,但结构元素和尺度的选取直接影响分析效果,选取合适的结构元素极为重要。

参考文献

- [1] Stone G C. The use of partial discharge measurements to assess the condition of rotating machine insulation[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1996, 12(4): 23-27.
- [2] Nagesh V, Gururaj B I. Evaluation of digital filters for rejecting discrete spectral interference in on-site PD measurements[J]. IEEE Trans on Electrical Insulation, 1993, 28(1): 73-85.
- [3] 全玉生, 高文胜, 严璋. 小波变换在局部放电测量中的应用研究[J]. 电网技术, 1998, 22(7): 35-41.
Quan Yusheng, Gao Wensheng, Yan Zhang. A new method on measuring partial discharge with wavelet transform[J]. Power System Technology, 1998, 22(7): 35-41(in Chinese).
- [4] 王立欣, 诸定秋, 蔡维铮. 局部放电在线监测中基于小波变换的阈值消噪算法研究[J]. 电网技术, 2003, 27(4): 46-48.
Wang Lixin, Zhu Dingqiu, Cai Weizheng. Wavelet transform based de-noise algorithm by thresholding in on-line partial discharge detection [J]. Power System Technology, 2003, 27(4): 46-48 (in Chinese).
- [5] 孙延奎. 小波分析及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.

- [6] 束洪春, 王晶, 陈学允. 动态电能质量扰动的多尺度形态学分析[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 63-67.
Shu Hongchun, Wang Jing, Chen Xueyun. Multiscale morphology analysis of dynamic power quality disturbances[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 63-67(in Chinese).
- [7] 崔屹. 图象处理与分析—数学形态学方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [8] 凌玲, 徐政. 基于数学形态学的动态电能质量扰动的检测与分类方法[J]. 电网技术, 2006, 30(5): 62-66.
Ling Ling, Xu Zheng. Mathematical morphology based detection and classification of dynamic power quality disturbances[J]. Power System Technology, 2006, 30(5): 62-66 (in Chinese).
- [9] 白嘉, 徐玉琴, 王增平. 基于形态学-小波综合算法的超高压输电线路单端行波保护新原理[J]. 电网技术, 2006, 30(2): 66-69.
Bai Jia, Xu Yuqin, Wang Zengping. A new protection scheme based on one terminal traveling wave for EHV transmission lines based on integrated morphology-wavelet algorithm[J]. Power System Technology, 2006, 30(2): 66-69(in Chinese).
- [10] 赵青春, 邹力, 刘沛. 基于数学形态学的线路超高速方向保护[J]. 电网技术, 2005, 29(21): 75-80.
Zhao Qingchun, Zou Li, Liu Pei. An ultra-high-speed directional protection for power transmission line based on mathematical morphology[J]. Power System Technology, 2005, 29(21): 75-80(in Chinese).
- [11] 杨明玉, 王世旭, 张举. 基于数学形态学梯度的快速选相方案[J]. 电网技术, 2006, 30(7): 64-68.
Yang Mingyu, Wang Shixu, Zhang Ju. A high-speed phase selection scheme based on mathematical morphology gradient[J]. Power System Technology, 2006, 30(7): 64-68(in Chinese).
- [12] 刘云鹏, 律方成, 李成裕. 局部放电灰度图象数学形态谱的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 181-183.
Liu Yunpeng, Lü Fangcheng, Li Chengrong. Study on pattern spectrum of partial discharge grayscale image[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 181-183(in Chinese).
- [13] 蒋刚毅, 郑义, 郁梅. 形态谱分量函数及形状分析[J]. 信号处理, 1998, 14(4): 289-295.
Jiang Gangyi, Zheng Yi, Yu Mei. Shape analysis based on pattern spectrum component function[J]. Signal Processing, 1998, 14(4): 289-295(in Chinese).
- [14] Maragos P A. Pattern spectrum and multiscale shape representation [J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence(II), 1989, (7): 701-716.
- [15] 邱昌容, 王乃庆. 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.

收稿日期: 2006-10-15.

作者简介:

李天云(1945—), 男, 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;

杨梅(1980—), 女, 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;

周喜超(1982—), 男, 硕士研究生, 研究方向为微机在电力系统中的应用;

程思勇(1979—), 男, 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。

(责任编辑 马晓华)