

绝缘试样老化过程中超宽频带放电信号的分形分析*

成永红 谢小军 蒋雁 陈小林 谢恒堃

西安交通大学 电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049

摘要 在超宽频带局部放电研究中, 局部放电特征峰的大小、位置和老化时间之间的变化规律, 一直是研究工作中的一个重点. 在应用小波分析技术提取超宽频带局部放电各频段信号的基础上, 提出了采用分形分析技术对局部放电信号各频段信号进行分维数的计算, 用分维数来量化分析超宽频带局部放电的频谱特性. 应用该方法, 对绝缘试样老化过程中特征峰的变化规律进行了量化分析, 发现了一些典型特征频段, 为根据局部放电特性进行的电力设备绝缘诊断奠定了技术基础.

关键词 超宽频带 局部放电 老化过程 特征峰 分形分析

在超宽频带局部放电检测中, 随着老化时间的增加, 放电波形有明显的变化, 其特征峰的位置和大小也随之变化. 量化分析超宽频带局部放电信号随老化过程的变化规律是超宽频带局部放电检测技术的一个关键. 分形分析技术是一种基于分形理论的新方法, 它已经在局部放电统计图形分析中得到了广泛的应用^[1,2]. 本文采用分形分析方法, 对超宽频带放电信号的变化规律进行研究, 取得了满意的效果.

本文首先对超宽频带局部放电信号进行小波包分解, 得到各个频段的分量, 然后利用分形理论计算各频段信号的分维数, 用分维数来量化分析信号特征峰的特征, 从而实现了超宽频带放电信号各频段波形特性的量化分析. 作为示例, 本文给出了一种绝缘试样在电老化过程中超宽频带放电信号的分形分析结果, 研究结果表明, 应用分形分析可以有效地分析老化过程中放电信号的变化规律.

1 基于小波提取的信号分形分析

1.1 小波提取原理

小波变换是信号的一种时间-频率分析方法, 它具有多分辨率分析的特点, 而且在时间、频率域都具有表征信号局部特征的能力, 是一个时间窗和频率窗都可以改变的时域和频域局部化分析方法.

小波包分析是信号的一种精细分析方法, 它将频带进行多层次划分, 对于多分辨率分析没有细分的高频段进一步分解, 并能够根据被分析信号的特征, 自适应的选择相应频段, 使之与信号频谱相匹配, 从而提高了时间-频率分辨率, 小波包分析适合于提取超宽频带局部放电信号的局部特征.

设 $\{h_n\}_{n \in \mathbb{Z}}$ 及 $\{g_n\}_{n \in \mathbb{Z}}$ 是 QMF (方形镜向滤波) 滤波器, 令

$$\begin{cases} W_{2n} = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} h_k W_n(2x - k) \\ W_{2n+1} = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} g_k W_n(2x - k) \end{cases}, \quad (1)$$

$\{W_n(2^l x - k)\}_{i, k \in \mathbb{Z}, n \in \mathbb{N}}$ 称为一个小波包, 其中 l 是尺度参数, k 是局部化参数, n 是振荡参数, 当 l 固定时, $\{W_n(2^l x - k)\}_{n, k}$ 构成 $L^2(\mathbb{R})$ 的一个正交基, 具有类似加窗 Fourier 变换的特性; 而当 n 固定时, $\{W_n(2^l x - k)\}_{l, k}$ 构成 $L^2(\mathbb{R})$ 的另一个正交基, 即小波正交基. 关于小波包分析的理解, 可以用一个 3 层分解进行说明, 其小波包分解树如图 1 所示.

采用小波包分解, 可以将超宽频带局部放电信号分解为各个频段的信号, 得到各个频段信号的特性, 以此为基础就可以进一步对各频段的波形特性进行量化分析. 在研究中, 采用了 Daubechies 小波

2001-09-18 收稿, 2001-11-09 收修改稿

* 国家自然科学基金重点项目(批准号: 59837260)及国家自然科学基金(批准号: 50077014)资助项目

E-mail: cyh@xjtu.edu.cn

作为小波函数, 并应用 Matlab 程序语言来实现超宽频带局部放电信号的各频段信号的提取^[3,4].

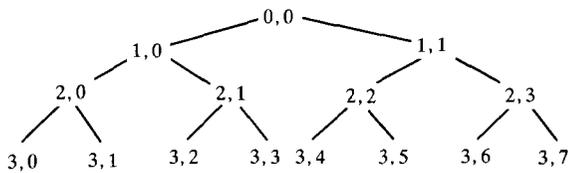


图1 3层小波包分解树

1.2 信号的分形分析

分形理论是近年来发展较快的一门学科, 在信号处理方面具有较强的功能. 分形理论认为维数不必是整数, 可以是分数维数. 关联维数是分维数的一种, 它反映了动力系统相空间维数的大小, 它的定义与计算是建立在动力系统重构理论之上的. 若用重构的相空间轨道矢量 X_i 来计算关联维数, 则关联维数可由下列关联函数导出^[5-7]

$$C(r) = \frac{1}{N_m^2} \sum_i \sum_j H(r - |X_i - X_j|), \quad (2)$$

$i, j = 1, 2, \dots, N_m,$

其中 $C(r)$ 为关联函数; r 为重构相空间中的超球半径; $H(r)$ 为单位阶梯函数, 当 $r > 0$ 时, $H(r) = 1$; 当 $r < 0$ 时, $H(r) = 0$.

关联函数 $C(r)$ 是相空间中针对每个向量在半径为 r 的超球内的相邻向量数的单位阶梯函数求和. 对于奇异吸引子, 关联函数 $C(r)$ 与超球半径有如下的幂律关系

$$C(r) \propto r^D, \text{ 当 } r \rightarrow 0, \quad (3)$$

其中 D 为关联维数. 对(3)式两边求对数得到

$$D = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\lg C(r)}{\lg r}. \quad (4)$$

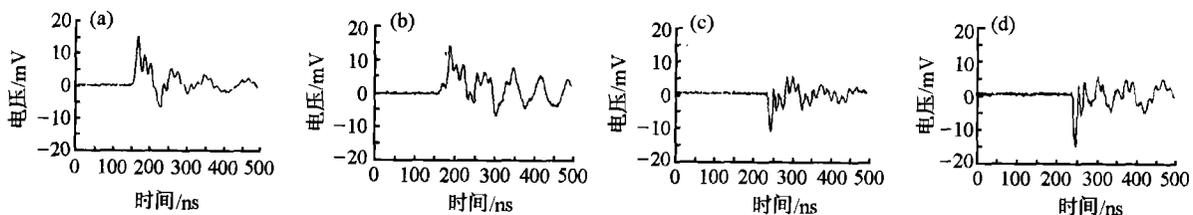


图2 锥-锥电极环氧试样电老化过程中超宽频带局部放电时域特性

(a) 老化前; (b) 老化 32 h; (c) 老化 64 h; (d) 老化 128 h

关联维数表示的是信号的复杂度, 对于同种性质的信号, 由于其复杂度相似, 其分维数也是很相近的. 而对于局部放电信号来说, 如果在某一频段, 没有特征峰, 那么该频段可能就是由噪声组成的, 而噪声(尤其是白噪声)的复杂度很高, 其关联维数相当大, 接近于 2. 而当在某一频段存在特征峰时, 该频段的信号的复杂度降低, 当关联维数接近 1 时, 特征峰显著. 换句话说, 当某频段的分维数很小时, 表明该频段的特征峰明显, 反之, 特征峰不明显. 所以, 局部放电特征峰可以用分维数来量化描述.

2 绝缘试样老化过程中超宽频带局部放电的分形分析

利用上面介绍的基于小波提取的局部放电信号分形分析方法, 可以对不同老化阶段的局部放电信号进行对比分析. 本文给出了圆锥-圆锥电极系统环氧绝缘试样电老化过程中分维数的变化规律研究的示例.

2.1 原始测量数据

作为研究对象, 本文研究了包含气隙的圆锥-圆锥电极系统环氧试样的超宽频带放电波形. 实验中, 采用 3 倍起始放电电压进行电老化, 图 2 是试样老化前及老化过程中测量的部分超宽频带放电信号^[8,9].

2.2 超宽频带放电信号的分形分析

对于上述的局部放电信号, 以前主要采用定性的时域或频域分析. 本文采用基于小波提取的超宽频带局部放电信号分形分析方法, 可以比较清晰地得到各频段的分维数的变化规律. 图 3 和 4 是 0~31.25 和 312.5~343.75 MHz 频段的部分分维数计算图, 图中直线(或近似直线)的斜率再加上 1, 即为分维数 D .

由图3和4的信号分维数图, 可以看到, 对于某一个频段, 在不同老化阶段, 信号所对应的分维数图不相同, 相应地, 分维数也不相同, 从而可以

量化分析特征峰的变化. 表1列出了老化过程中各阶段的分维数.

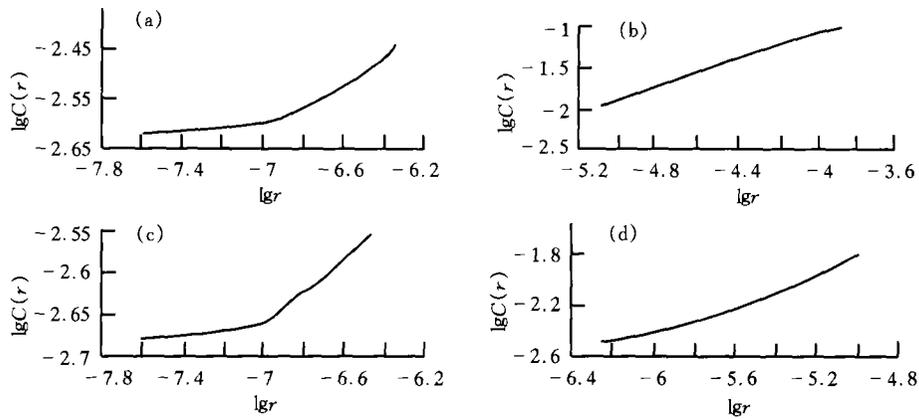


图3 不同老化阶段信号在0~31.25 MHz 频率段部分的分维数图

(a) 老化前; (b) 老化 32 h; (c) 老化 64 h; (d) 老化 128 h

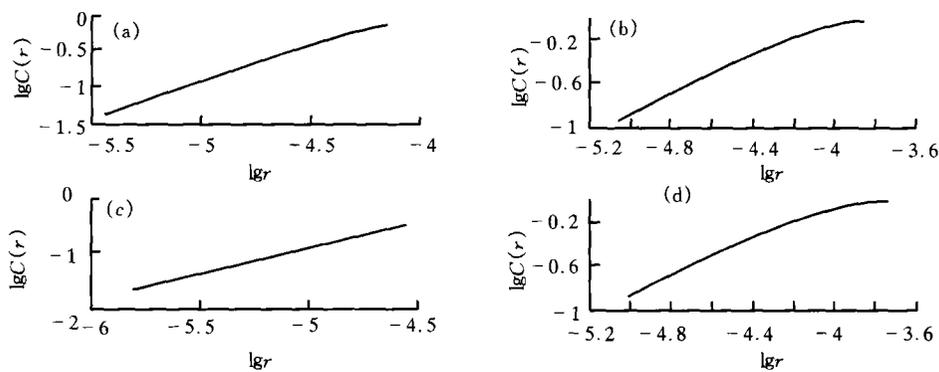


图4 不同老化阶段信号在312.5~343.75 MHz 频率段部分的分维数图

(a) 老化前; (b) 老化 32 h; (c) 老化 64 h; (d) 老化 128 h

表1 圆锥-圆锥电极系统环氧试样电老化各频段的分维数表

频段/MHz	老化时间/h					
	老化前	16	32	64	96	128
0~31.25	1.1500 ^{a)}	1.4456 ^{a)}	1.8008	1.1042 ^{a)}	1.8060	1.6299 ^{a)}
31.25~62.5	1.7312 ^{a)}	1.6871 ^{a)}	1.8272	1.6229 ^{a)}	1.8135	1.7546 ^{a)}
62.5~93.75	1.5826 ^{a)}	1.9127	1.9426	1.9639	1.9201	1.8849
93.75~125	1.9414	1.7040 ^{a)}	1.7886 ^{a)}	1.8624	1.9387	1.4170 ^{a)}
125~156.25	1.9374	1.8550	1.9072	1.9305	1.8556	1.7202 ^{a)}
156.25~187.5	1.9425	1.9524	1.9512	1.9509	1.9433	1.9532
187.5~218.75	1.9344	1.8671	1.9533	1.9223	1.9517	1.8869
218.75~250	1.9220	1.9304	1.9626	1.9508	1.9552	1.9429
250~281.25	1.9373	1.9661	1.9291	1.9426	1.9176	1.8908
281.25~312.5	1.9300	1.7560 ^{a)}	1.9473	1.9050	1.7980 ^{a)}	1.9415
312.5~343.75	1.9380	1.7692 ^{a)}	1.7338 ^{a)}	1.9535	1.4934 ^{a)}	1.6906 ^{a)}
343.75~375	1.8082	1.7883 ^{a)}	1.7979 ^{a)}	1.8637	1.8263	1.8738
375~406.25	1.9236	1.9199	1.9646	1.9456	1.9619	1.9609
406.25~437.5	1.7808 ^{a)}	1.9524	1.8989	1.9517	1.9260	1.8828
437.5~468.75	1.7886 ^{a)}	1.8181	1.8146	1.8544	1.8927	1.8708
468.75~500	1.9539	1.9522	1.8904	1.9497	1.9327	1.9632

a) 表示相应于此分维数的频段存在特征峰

为了更直观些,可将分维数的倒数和频率的关系表示如图5,可看出分维数的倒数数值越大,特征峰越明显.

从表1可以量化分析特征峰的变化规律.根据分维数对应的波形的复杂程度,可以认为分维数小于1.8的波形是有明显峰值的波形,即存在特征峰(如表1中用a)所示).由图5更清晰地看到在0~50,100~150,300~350 MHz等频段,随着老化的深入,其特征峰产生明显变化,这对于进一步的数值分析具有重要意义.由图5还可得出以下结论.

(1) 在0~31.25 MHz 频率段,在老化前和老化中的分维数都较小,表明在这个频率段有特征峰存在,且随着老化时间延长,分维数有增大的趋势,这说明随着老化进行,在低频段特征峰有减弱的趋势.

(2) 在31.25~62.5 MHz 频率段,在老化前和老化中分维数都较小,表明该频段在老化过程中一直有特征峰存在,但不很显著.

(3) 在62.5~93.75 MHz 频率段,在老化前,分维数较小,有特征峰存在,老化以后,该频率段的特征峰消失,并且随着老化进行,特征峰有向高频段移动的趋势,随着老化的深入,在93.75~125 MHz频率段出现特征峰.

(4) 在281.25~312.5和312.5~343.75 MHz 频率段,老化前该频率段分维数很大,未出现特征峰,随着老化时间延长,该频率段的分维数迅速减小;在312.5~343.75 MHz 频率段,经老化一段时间后,出现特征峰,并且特征峰有增大的趋势,有可能此处是更好的特征峰检测频段.

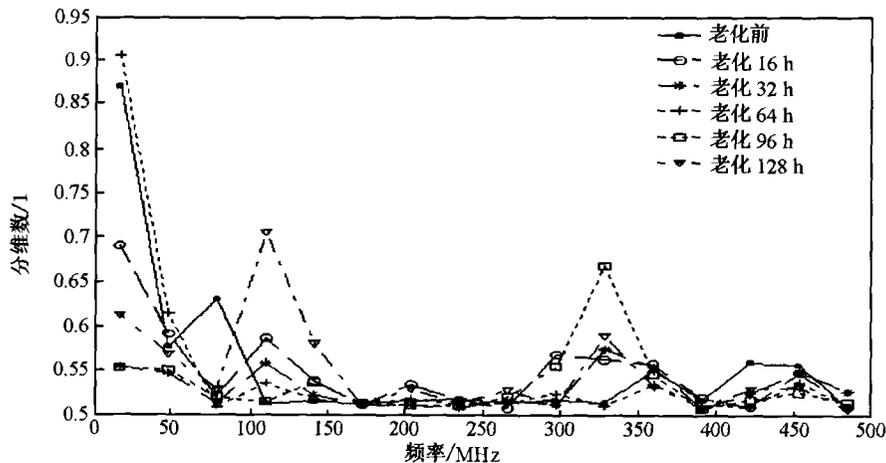


图5 锥-锥电极分维数的倒数和频率关系图

3 结论

本文提出了一种在小波分析基础上,基于分形理论的超宽频带局部放电信号的数值计算方法,这是一种对超宽频带放电信号进行量化分析的方法.对于锥-锥电极系统环氧试样,在其老化过程中,在0~31.25和31.25~62.5 MHz 频率段一直存在特征峰,而随着老化过程的深入,在93.75~125和312.5~343.75 MHz 频率段开始出现特征峰,特别是312.5~343.75 MHz 频率段特征峰变化明显,可以成为测量的重点频率段.

参 考 文 献

- 1 Candela R, et al. PD recognition by means of statistical and fractal parameters and a neural network. IEEE Trans on Dielect and Elec Insul, 2000, 7: 87
- 2 Li J, et al. Pattern recognition of partial discharge with fractal analysis to characteristic spectrum. In: Proceedings of ICPADM, Xi'an, China, 2000, 00CH36347: 720
- 3 崔锦泰著,程正兴译.小波分析导论.西安:西安交通大学出版社,1995
- 4 胡昌华,等.基于MATLAB的系统分析与设计——小波分析.西安:西安电子科技大学出版社,1999
- 5 Mandelbort B B. The Fractal Geometry of Nature, New York: Freeman, 1983
- 6 杨展如.分形物理学.上海:上海科技教育出版社,1999
- 7 肯尼思·法尔科内著,曾文曲,等译.分形几何中的技巧.沈阳:东北大学出版社,1999
- 8 Cheng Y H, et al. The characteristics of ultra-wideband partial discharge of insulation in aging process. In: Proceedings of ICPADM, Xi'an, China, 2000, 00CH36347: 194
- 9 Borsi H. The relation between thermal and electrical stress and the PD behavior of epoxy-resin transformers. IEEE Trans on Elec Insul, 1993, 28: 1007