

局部放电脉冲的 Wigner 时频分布特性研究

袁 鹏, 司文荣, 李军浩, 李延沐, 罗勇芬, 李彦明

(西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 为了提高时频分布的分析精度和有效性, 笔者根据局部放电脉冲信号的非平稳特性, 提出使用联合时频分布对其进行处理, 从而分析脉冲信号的时频特性。针对目前在非平稳信号处理中广泛使用、属于 Cohen 类的 Wigner-Ville 分布(WVD), 笔者以仿真脉冲为对象, 分别研究了其原始 WVD、平滑伪 Wigner 分布(SPWVD)以及重排平滑伪 Wigner 分布(RSPWVD)。分析结果表明: WVD 能够对局部放电脉冲信号引发的短时变化具有高度的敏感性, 更适合表征非平稳信号的时变信息; SPWVD 能消除双线性函数引起的交叉干扰项, 但是以牺牲分布的时频分辨率为代价的; RSPWVD 具有很好的时频聚集性, 易于提取单个脉冲波形的时频特征参数, 从而用于放电类型的模式识别以及深入研究绝缘系统中的局部放电机理。

关键词: 局部放电; Wigner 分布; 平滑伪分布; 重排; 时频分析

中图分类号: TM835.4

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2008)06-0524-03

Time-frequency Characteristics of Partial Discharge Pulse with Wigner-ville Distributions

YUAN Peng, SI Wen-rong, LI Jun-hao, LI Yan-mu, LUO Yong-fen, LI Yan-ming

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: According to the unstability of partial discharge pulse signals, a joint time-frequency analysis method was put forward to process the signals to obtain their characteristics in time-frequency domain. Since the wigner-ville distribution which belongs to the Cohen class time-frequency energy distribution is commonly used at present for processing unstable signals, a simulated PD pulse was chosen as the object to investigate its original WVD, smoothing pseudo Wigner distribution (SPWVD) and rearranged-smoothing-pseudo Wigner distribution (RSPWVD). The results show that WVD is highly sensitive to the short-variation of unstable PD signal, which is more suitable to extract time-varying information. SPWVD can remove the cross-terms of interference caused by the bilinear function but reduce the time-frequency resolution. For having good time-frequency concentration, RSPWVD provides a powerful tool to evaluate parameters for single PD pulse shape, which can be used in PD pattern recognition and in-depth study of PD mechanism in electrical insulation system.

Key words: partial discharge (PD); wigner-ville distribution(WVD); smoothing-pseudo distribution; rearrange; time-frequency analysis

0 引言

近年来, 基于单个放电脉冲的超宽带(UWB)检测技术取得了一定的进展, 该技术拓宽了局部放电的检测频带, 提高了检测系统识别局部放电信号和干扰信号的能力。提取单个脉冲波形所包含的放电信息, 对深入研究电力设备绝缘系统中的局部放电机理、放电脉冲在设备中的传播规律以及对放电类型进行模式识别等都具有重要意义。在时域上, 单个放电脉冲波形的特征参数提取方法研究已经相当完

善^[1]; 而在频域上, 传统的 Fourier 频谱分析主要是用来说明信号中包含哪些频率成分以及它们所对应幅值的大小, 但无法说明这些频率成分出现的具体时刻(见图 1), 因此引入了联合时频分析^[2,3]。

联合时频分析在处理具有时变频谱的非平稳信号时, 既能在总体上把握信号, 又能从局部分析信号的时频特性, 从而易于从信号中提取出更多的特征信息。为了提高时频分布的分析精度和有效性, 先后发展了多种不同的时频分布方法^[4,5]。

笔者针对在非平稳信号处理中广泛被使用且具有良好的性质的 Wigner-ville 分布, 以仿真脉冲波形为

收稿日期: 2007-12-26; 修回日期: 2008-06-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50377034); 国家自然科学基金资助项目(50877064)。

作者简介: 袁 鹏(1975-), 男, 博士研究生, 从事局部放电检测和故障诊断技术研究。

对象,分别研究了其原始 Wigner-ville 分布(WVD)、平滑伪 Wigner-ville 分布(SPWVD)以及重排平滑伪 Wigner-ville 分布(RSPWVD)的时频分布特性。

1 局部放电脉冲波形

理论和实际工况表明,高压电器设备中局部放电脉冲信号多为如下形式^[6,7]

单指数衰减波形

$$P_1(x) = Ae^{-t/\tau} \quad (1)$$

双指数衰减波形

$$P_2(x) = A(e^{-t/\tau_1} - e^{-t/\tau_2}) \quad (2)$$

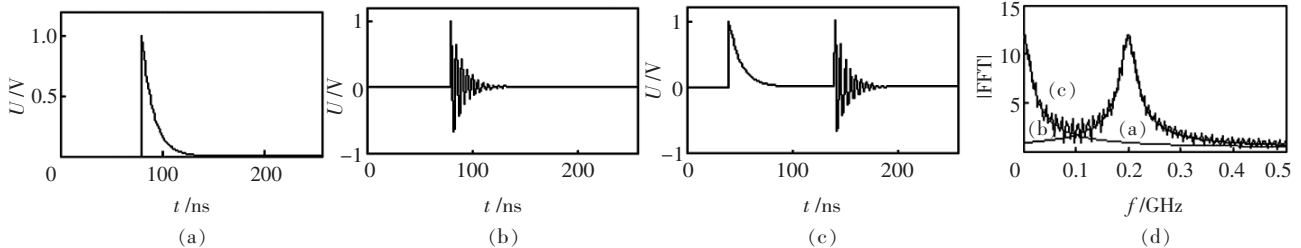


图 1 仿真脉冲的频谱

笔者选用具有代表性的单指数衰减波形(图 1(a))和单指数衰减振荡波形(图 1(b))为对象进行研究。图 1 中所示仿真脉冲波形的参数如下:其采样率均为 1 GHz,幅值均为 1 V;图 1(a)和图 1(b)脉冲起始时刻均为 80 ns,持续时间均为 60 ns,图 1(b)脉冲的振荡频率为 0.2 GHz;而图 1(c)由图 1(a)和图 1(b)所示两个脉冲组成(模拟连续放电),脉冲的起始时刻分别为 40、140 ns。由于目前各种去噪算法对实际脉冲信号波形处理的成功应用,笔者给出的仿真脉冲波形中不添加白噪声项。

2 Wigner-ville 时频分布特性比较

2.1 原始 WVD

目前,用于信号的时频联合分析方法有很多,而 WVD 是 Cohen 类时频分布中具有代表性的一种分布^[8,9],其定义如下

$$W_x(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t + \frac{\tau}{2})x^*(t - \frac{\tau}{2})e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (5)$$

可以看出,WVD 是信号的双线性函数,因而有 $W_{x+y} = W_x + W_y + 2R(W_{x,y})$, $W_{x,y}$ 是交叉干扰项, $W_x(t, \nu)$ 和 $W_y(t, \nu)$ 为信号项。需要指出的是,所有的 Cohen 类时频分布都是信号的双线性函数,均无法避免存在交叉干扰项的问题。

图 1 所示仿真脉冲的 WVD 见图 2。谱图清晰地刻画了整个脉冲频率以及对应能量幅值(二维图中颜色、三维图中峰的高低)随时间的变化过程。其时间分辨率和频率分辨率都很好,但时频聚集性较差。图 2(c)中连续脉冲的 WVD 出现了非常严重的交叉干扰项。若在信号参数未知的情况下,在该时频谱图

单指数衰减振荡波形

$$P_3(x) = Ae^{-t/\tau} \sin 2\pi f_c t \quad (3)$$

双指数衰减振荡波形

$$P_4(x) = A(e^{-t/\tau_1} - e^{-t/\tau_2}) \sin 2\pi f_c t \quad (4)$$

式(1)~(4)中, A 表示局部放电脉冲的最大幅值; τ 表示衰减系数; f_c 表示放电谱的振荡频率。可以看出,局部放电脉冲是一个非周期波,从波动的观点来说,它可以展开为 Fourier 级数,分解为各次谐波的叠加,进而可以研究诸谐波的频率和振幅的关系。一个非周期波经过 Fourier 变换可以得到一个连续的频率谱图,见图 1。

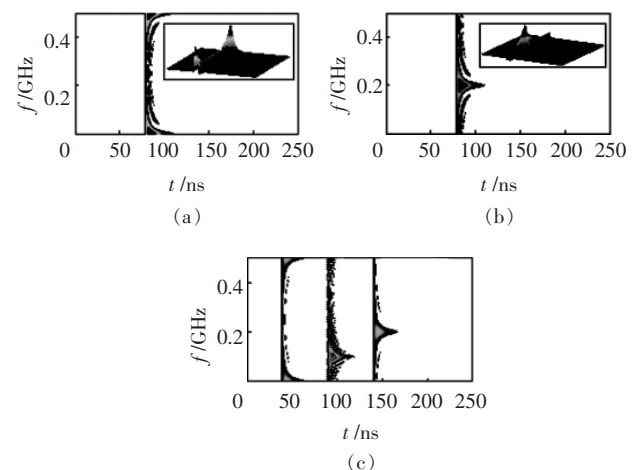


图 2 仿真脉冲的 WVD

中是无法区分信号项和交叉干扰项的。

2.2 平滑伪 Wigner 分布(SPWVD)

对式(5)进行加窗处理,就得到了伪 WVD (PWVD)

$$PW_x(t, \nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau)x(s + \frac{\tau}{2})x^*(s - \frac{\tau}{2})dse^{-j2\pi\nu\tau} d\tau \quad (6)$$

式(6)中的平滑函数只能由短时窗 $h(t)$ 控制,如果通过考虑分离平滑函数来增加控制的自由度,可获得改进的独立平滑控制,所得分布^[8,9]

$$SPW_x(t, \nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau) \int_{-\infty}^{+\infty} g(s-t) \cdot x(s + \frac{\tau}{2})x^*(s - \frac{\tau}{2})dse^{-j2\pi\nu\tau} d\tau \quad (7)$$

式(7)称为平滑伪 WVD (SPWVD)。通过时频分辨率和相干项影响程度间的折衷,虽然可以消除交叉干扰项,但在时域、频域或时频上平滑处理程度越

高,其时域、频域或时频域上的分辨率就越低。

仿真脉冲的 SPWVD 见图 3。与图 2 所示的原始 WVD 相比,其时间分辨率和频率分辨均变差,时频聚集性也没有得到改善,但图 3(c)消除了图 2(c)中存在的交叉干扰项。

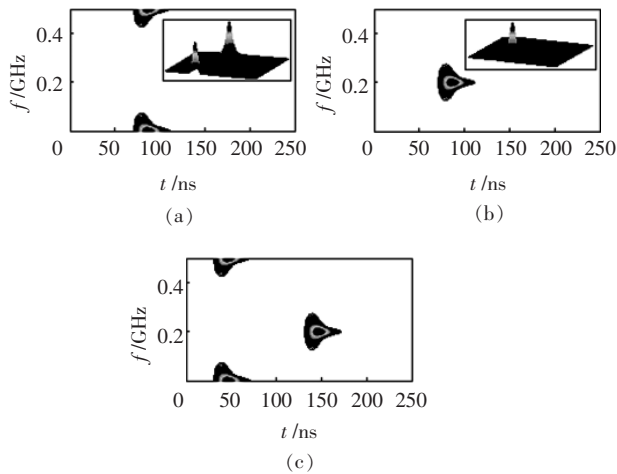


图 3 仿真脉冲的 SPWVD

2.3 重排平滑伪 Wigner 分布 (RSPWVD)

上述讨论的 Wigner 分布具有不同的特性,但关键的问题是要提高这些分布得到图像的可读性。也就是说,不仅要使有用的信号项具有良好的时频分辨率,而且还不能使相干项给人们分析问题产生误导。目前,相关研究人员在这方面做了一些努力,得到了一种被称为重排的通用方法。

将 Cohen 类的一般表达式看作是 WVD 的二维卷积 $C_x(t, \nu, \Pi) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \Pi(t-s, \nu-\varepsilon) W_x(s, \varepsilon) ds d\varepsilon$, 则适合任何 Cohen 类成员的重排公式如下^[8,9]

$$\hat{t}(x, t, \nu) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} s \Pi(t-s, \nu-\varepsilon) W_x(s, \varepsilon) ds d\varepsilon}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \Pi(t-s, \nu-\varepsilon) W_x(s, \varepsilon) ds d\varepsilon}$$

$$\hat{\nu}(x, t, \nu) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \varepsilon \Pi(t-s, \nu-\varepsilon) W_x(s, \varepsilon) ds d\varepsilon}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \Pi(t-s, \nu-\varepsilon) W_x(s, \varepsilon) ds d\varepsilon}$$

$$C_x^r(t', \nu', \Pi) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} C_x(t, \nu, \Pi) \delta[t' - \hat{t}(x, t, \nu)] \delta[\nu' - \hat{\nu}(x, t, \nu)] dt d\nu \quad (8)$$

式(8)如果选择合适的平滑核 Π ,重排后的分布能将相干项的抑制与信号时频聚集性的提高有效地结合起来。笔者将平滑伪 Wigner 分布进行重排,得到重排平滑伪 Wigner 分布 RSPWVD。

仿真脉冲的 RSPWVD 见图 4。可以看出,该时频分布具有很好的时频聚集性,但其时间和频率分辨一般,这是由 SPWVD 所决定的。

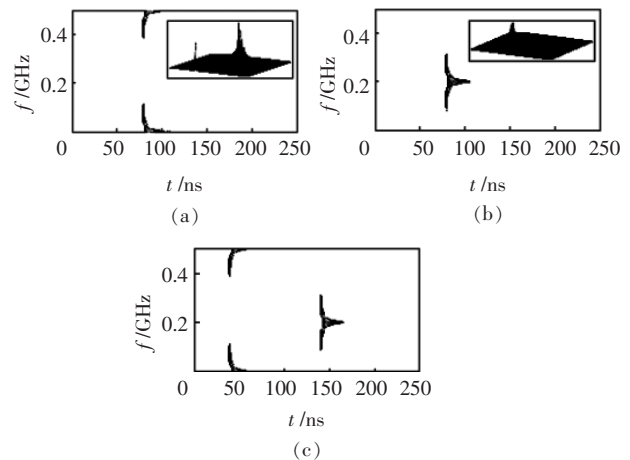


图 4 仿真脉冲的 RSPWVD

3 分析与比较

交叉干扰项是 Cohen 类双线性时频分布的一个必然结果。这在诸如多分量信号相互作用生成的信号时频分布中通常是明显的。交叉干扰项在时域或频域上经常表现与信号的基本物理性质不相一致。相比而言,时频分布的信号项来源于信号的各个独立分量,而且在时频分布有限支撑下与信号的基本性质是一致的。伪平滑分布虽然能够去除双线性时频分布固有的交叉干扰项,但需要牺牲分布的时频分辨率。重排方法在原有分布所具有的本身性能的前提下,能够增加时频分布图像的可读性,提高时频分布的时频聚集性能,从而使得易于从时频分布中提取特征参数。

表 1 从交叉干扰项、时频分辨率和时频聚集性比较了上述的 3 种 WVD。在实际处理局部放电信号时,有时对分布的时频分辨率要求较高,有时对分布的消除交叉干扰项性能要求较高,有时则对分布的时频聚集性能要求较高。据此,可根据表 1 而选择不同的 WVD 对局部放电脉冲信号进行处理。

类型	交叉干扰项	时频分辨率	时频聚集性
WVD	强	好	差
SPWVD	消除	差	差
RSPWVD	消除	差	好

4 结语

基于局部放电仿真脉冲的 Wigner-ville 时频分布特性研究表明:WVD 能够对局部放电脉冲信号引发的短时变化具有高度的敏感性,更适合表征非平稳信号的时变信息;SPWVD 能消除双线性函数引起的交叉干扰项,但是以牺牲分布的时频分辨率为代价的;RSPWVD 具有很好的时频聚集性。因此可根据不同分析目的选择相应的时频分布对局部放电脉冲进行处理。(下转第 530 页)

表3 4种结构的棒形悬式绝缘子串电场分布计算结果

绝缘子结构	轴向电场分布曲线中电场强度最大值/(V·mm ⁻¹)			
	截取路径 X=10 mm (穿过芯棒)	截取路径 X=50 mm (穿过大小伞和空气间隙)	截取路径 X=90 mm (穿过大伞和空气间隙)	截取路径 X=400 mm (与均压环外侧相切)
整体单支	256.982(见图9)	279.444	264.819	759.315
1/3 和 2/3 两有机元件组合	249.870	298.046	257.555	638.328
1/6 和 5/6 两有机元件组合	255.177(见图10)	303.891	263.599	641.883
1/6 瓷元件和 5/6 有机元件组合	244.867(见图11)	X=60 mm 时, 350.972	X=85 mm 时, 323.823	644.310

注:组合结构的两元件连接处均带屏蔽环。

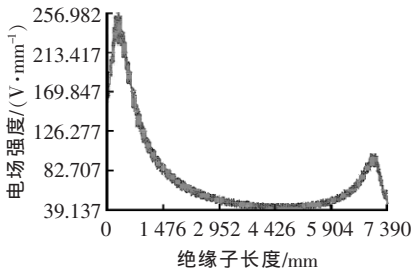


图9 整体单支

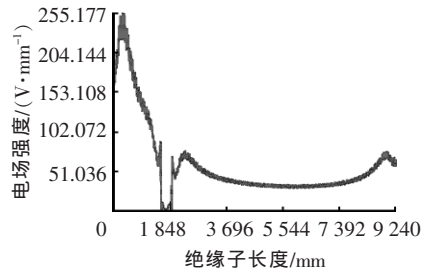


图10 1/6 和 5/6 两有机元件组合

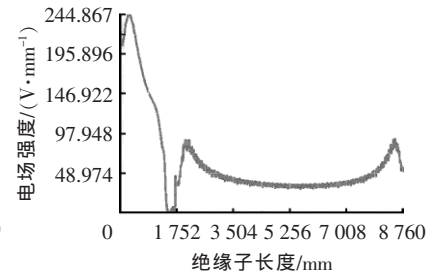


图11 1/6 瓷和 5/6 有机元件组合

时考虑到3种结构的长度,可以看出,由两个有机复合元件串联成的组合式对电场分布没有任何改善,同时元件连接处不加装均压环时,会引起局部的场强集中,尤其是由1/6和5/6两种元件组合而成的有机复合绝缘子。因此,在结构上,采用整体单支比由两个元件组合而成的有机复合绝缘子好。

(2)通过对第1、4种结构的棒形悬式绝缘子电场分布云图和电场分布曲线的比较,整体单支有机复合绝缘子其伞裙附近的最大场强一般超过320 V/mm;采用瓷质绝缘子和有机复合绝缘子组串时,有机复合绝缘子伞裙附近的场强明显降低,最大场强小于110 V/mm。

(3)采用瓷质棒形绝缘子和有机复合棒形绝缘子组串,由于瓷的介电常数大于芯棒和伞套材料的介电常数,相同长度、结构相近的瓷质绝缘子的电容要大于有机复合绝缘子,电容效应可以最大限度地实现分布电压均匀化。因此,采用瓷质绝缘子和有机复合绝缘子组串比采用整体单支有机复合绝缘子的电场分布更均匀。同时,可以充分利用瓷质绝缘子良好的耐电弧性和有机复合绝缘子良好的憎水防污性,有效抑制复合绝缘子的电晕放电和电蚀损。

参考文献:

- [1] 张锐. 我国复合绝缘子关键制造技术的发展与展望[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 106-110.
- [2] 吴光亚, 蔡炜. 复合绝缘子存在及研究的问题[J]. 电瓷避雷器, 2000, 214(4): 15-17.
- [3] YA Dong. Simulation of Electric Field Distribution of Composite Insulator [C]// XIVth International Symposium on High Voltage Engineering, 2005: 27-32.
- [4] 谷山强, 何金良, 陈维江, 等. 复合绝缘子均压环导弧性能的仿真分析[J]. 高电压技术, 2007, 33(7): 22-25.
- [5] QIU Wei-guo, SABO S A. Electric Field and Potential Distributions along Dry and Clan Non-ceramic Insulator[C]// Electrical Insulator Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference, Proceedings, 2001: 437-440.
- [6] 杨杰, 吉晓波, 周国华, 等. 均压装置对复合绝缘子电气性能的影响[J]. 高电压技术, 2004, 30(2): 24-25.
- [7] 周志成, 何俊佳, 陈俊武, 等. 均压环改善绝缘子串电压分布研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(11): 45-48.
- [8] VANCIA B, SAHA T K, GILLESPIE T. Electric Field Modelling of Non-ceramic High Voltage Insulators [C]// Australasian Universities Power Engineering Conference, 2005: 25-28.
- [9] 孙西昌. 特高压交流棒形悬式复合绝缘子的研究[J]. 电瓷避雷器, 2006, 214(6): 1-6.

(上接第526页)

参考文献:

- [1] 王国利, 郝艳捧, 李彦明. 油中典型局部放电模型放电波形特征参数的提取[J]. 电网技术, 2001, 25(10): 34-37.
- [2] 王猛, 谈克雄, 高文胜, 等. 局部放电脉冲波形的时频联合分析特征提取方法[J]. 电工技术学报, 2002, 17(2): 76-79.
- [3] 王国利, 郝艳捧, 李彦明, 等. 联合时频分析应用于局部放电信号处理的研究[J]. 高电压技术, 2001, 27(3): 12-14.
- [4] COHEN L. Time-frequency Distribution- a Review Proc. [J]. IEEE, 1989(77): 941-981.
- [5] 科恩. 时-频分析: 理论与应用[M]. 白居宪, 译. 西安: 西安交

通大学出版社, 1998.

- [6] 黄成军, 郁惟镛. 基于小波分解的自适应滤波算法在抑制局部放电窄带周期干扰中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 107-111.
- [7] 肖燕, 郁惟镛. 用于提取局放脉冲的波形匹配识别方法初探[J]. 电工技术学报, 2005, 20(5): 87-91.
- [8] AUGER F, FLANDRIN P, LEMOINE O. Time-frequency Toolbox Reference Guide[M]. GdR ISIS, 2005.
- [9] 胡昌华. 基于MATLAB的系统分析与设计时频分析[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002.