

用傅立叶级数法消除局部放电检测中窄带干扰的研究

程养春¹, 李成榕², 王伟³

- (1. 华北电力大学电气工程学院, 北京市 昌平区 102206;
2. 高电压与电磁兼容北京市重点实验室, 北京市 昌平区 102206;
3. 电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206)

RESEARCH ON ELIMINATING NARROW FREQUENCY NOISE BY FOURIER SERIES IN PARTIAL DISCHARGE DETECTION

CHENG Yang-chun¹, LI Cheng-rong², WANG Wei³

- (1. North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China;
2. Beijing key laboratory of High Voltage and EMC, Changping District, Beijing 102206, China;
3. Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control (North China Electric Power University), Ministry of Education, Changping District, Beijing 102206, China)

ABSTRACT: A new method of eliminating periodical narrow frequency noises in partial discharge detection of power apparatus, Fourier series method, is presented. It uses Fourier series of the original data to evaluate the noise, and subtracts the original data with the evaluated noise. So, the noise is eliminated but partial discharge pulses are retained. The anti-interference effect of this method is proved by simulation data and field test data. At the same time of eliminating noises, the shape, amplitude and polarity of pulse signals can be completely remained, even if the main frequency of partial discharge pulses are close to that of narrow frequency noises. The influence of random noise, frequency error and quantization error are also discussed. It is found that this influence is very limited. The effect of this method is also contrasted with time-frequency domain transform method and adaptive filter method. The results show that the new method has obvious predominance of keeping the shape, amplitude and polarity of partial discharges.

KEY WORDS: Partial discharge; Narrow frequency noise; Fourier series; Electric power apparatus

摘要: 提出了一种新的抗窄带干扰方法——傅立叶级数法, 利用原始数据通过傅立叶级数估计原始数据中的窄带干扰波形, 然后与原始数据相减, 以得到局部放电脉冲信号; 通过仿真数据和现场实际数据验证了该方法的抗干

扰效果, 发现该方法能够在完全消除窄带干扰的同时, 基本保留局部放电脉冲的波形、幅值和极性, 尤其在脉冲信号的中心频谱与干扰的频谱非常接近时; 讨论了随机干扰、频率误差和模数转换量化误差对抗干扰效果的影响, 认为这些因素对抗干扰效果的影响不大; 与常见的时频转换法和自适应滤波法进行了对比分析, 结果表明傅立叶级数法在保持局部放电原始波形、幅值和极性信息方面具有明显优点。

关键词: 局部放电; 窄带干扰; 傅立叶级数; 电力设备

1 引言

局部放电信号检测是反映大型电力设备绝缘状况的重要手段之一^[1-2]。在线测量局部放电时, 往往会遇到一些周期性窄带干扰^[3]。抑制周期性窄带干扰的措施主要有硬件滤波技术和软件数据处理技术, 如数字滤波器技术^[4]、时频转换滤波(频域谱线清除)技术^[3]、小波滤波技术^[5-8]、自适应滤波技术^[9]及多种技术的结合(如自适应滤波与有限冲击响应滤波器 FIR 相结合^[10], 自适应滤波与小波滤波相结合^[11])。这些技术基本利用了窄带干扰与局部放电脉冲信号频谱不重合的特点, 即信号与干扰之间频带不同, 从而将两者区别开来。实际应用中, 这些技术取得了显著的效果, 但也存在不足之处。主要问题在于局部放电信号频谱中频率越高谱值

越小，大部分低频分量与窄带干扰频谱重叠，采用上述方法势必将局部放电脉冲的低频分量与窄带干扰一起消除，从而使局部放电信号的幅值、极性和波形发生严重变化。为了更好地诊断局部放电类型和严重程度，实现局部放电源定位，要求尽量保留信号的幅值、极性和波形信息^[12-14]。因此，仍然需要研究新的周期性窄带干扰抑制技术，做到既能很好地抑制窄干扰，大幅提高信噪比，又能较好地保留信号的幅值、极性和波形特征。

本文提出了一种新的抗干扰方法，即利用原始数据通过傅立叶级数估计原始数据中的窄带干扰波形，然后与原始数据相减，以得到脉冲信号；并系统地研究了傅立叶级数法抗干扰原理、效果和影响因素；利用仿真数据和实测数据进行验证；与现有主要方法的对比分析等。分析结果表明，该方法在保持局部放电原始波形、幅值和极性特征方面具有明显优点，并且能够很好地消除窄带干扰、大幅提高信噪比。

2 傅立叶级数法抗干扰原理

当函数 $f(t)$ 满足 Dirichlet 条件时，能够展开成傅立叶级数

$$f(t) = a_0/2 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos kt + b_k \sin kt) \quad (1)$$

式中 系数 a_k 和 b_k 称为函数 $f(t)$ 的傅立叶系数。

文中所述的窄带干扰，每一频道都是一个正弦或余弦周期函数，并且满足 Dirichlet 条件。根据叠加定理和三角函数加法运算，当现场存在多个窄带干扰时，总干扰波形 $f(t)$ 仍然具有周期性，并且满足 Dirichlet 条件，因而可以用其傅立叶级数表示，如式(1)。此时，不为零的傅立叶系数的最大数目是干扰频率数目的两倍。

由于傅立叶系数为有限多个，可以根据式(2)利用 $f(t)$ 的有限个函数值 $f(t_i)$ 求出系数 a_k 和 b_k 。若已知各傅立叶系数，即可根据式(1)计算 $f(t)$ 在任何时刻的函数值。

$$\begin{bmatrix} 1 & \cos(w_1 t_1) & \sin(w_1 t_1) & \cos(w_2 t_1) & \sin(w_2 t_1) & \cdots \\ 1 & \cos(w_1 t_2) & \sin(w_1 t_2) & \cos(w_2 t_2) & \sin(w_2 t_2) & \cdots \\ 1 & \cos(w_1 t_3) & \sin(w_1 t_3) & \cos(w_2 t_3) & \sin(w_2 t_3) & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \times \quad (2)$$

$$[a_0/2 \ a_1 \ b_1 \ a_2 \ b_2 \ \cdots]^T = [f(t_1) \ f(t_2) \ f(t_3) \ \cdots]^T$$

基于上述分析，可以通过下列步骤实现抗干扰：①选取 $f(t)$ 的不含局部放电脉冲的一段窄带干

扰波形的采样值(称为干扰段)进行快速 FFT 变换，计算出窄带干扰各频道的中心频率 w_i ；②将已确定的频率 w_i 带入式(2)左侧，计算系数矩阵，并将干扰段函数值 $f(t_i)$ 带入式(2)右侧，利用矩阵运算求解求取干扰函数的傅立叶系数；③将傅立叶系数带入式(1)计算 $f(t)$ 在任意时刻(包括局部放电信号所在位置)的数值 $F(t)$ 。显然 $F(t)$ 只会含有窄带干扰成分，而不会含有局部放电脉冲信号，称为参考段；④按式(3)计算 $f(t)$ 与 $F(t)$ 之间的差值 $y(t)$ ，则窄带干扰相抵消，差值 $y(t)$ 就是局部放电脉冲信号

$$y(t) = f(t) - F(t) \quad (3)$$

由于该方法对局部放电信号未作任何处理，因此能够最大限度地保留局放信号的所有特征，包括波形、幅值和极性。当抗干扰要求不十分严格时，该过程可以简化，即利用含有局部放电和干扰的数据计算干扰的傅立叶级数，并在该时间段内按式(1)进行窄带干扰估算和按式(3)求取局部放电信号。局部放电信号一般显现为时间极短的脉冲，在整个用于计算傅立叶级数的数据中所占比重很小，引入的误差也很小。经过简化后，可以直接对采集到的数据进行处理，而不必关心数据中是否含有局部放电信号。这种计算方法称为简化算法，相应未做简化处理的算法称为精确算法。

3 傅立叶级数法抗干扰仿真计算

3.1 窄带干扰的仿真

为了验证傅立叶级数法抗干扰效果，本文首先进行了仿真计算。将频率、幅值、初相角都为随机数的十个正弦函数(频率为 260、300、380、410、530、560、660、740、990、1060kHz)叠加后形成窄带干扰，并利用 200MS/s 的采样速率进行采样，形成 20μs 长的干扰信号如图 1 所示，其频谱如图 2 所示。

局部放电脉冲本身具有极快的上升沿，宽度也很窄。但是，一般情况下当局部放电信号从电气设备内部传出，并经过传感器和数据处理模块的处理之后，常发生展宽和振荡。本文选用由电容传感器从实验室获得的发电机定子线棒模型上的局部放电脉冲(采样速率为 200MS/s，精度为 8 位 A/D)。其波形如图 3 所示，其频谱如图 4 所示。可见，所测到的局放脉冲的能量集中在 10MHz 以下的低频带。局部放电脉冲和窄带干扰叠加后形成图 5 所示的混合波形，脉冲被叠加在干扰波形的 15μs 附近，此时信噪比(局放峰峰值比干扰峰峰值)为 1/6。

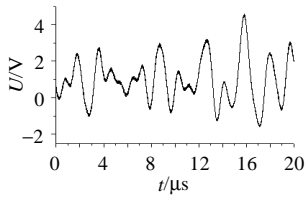


图1 窄带干扰仿真波形
Fig.1 The waveform of simulated narrow frequency noises

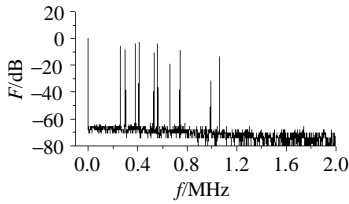


图2 窄带干扰仿真波形的频谱
Fig.2 The spectrum of simulated noises

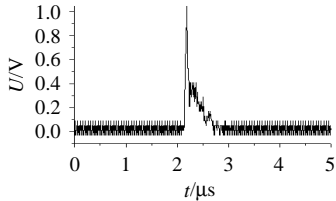


图3 局部放电脉冲波形
Fig.3 The waveform of one partial discharge pulse

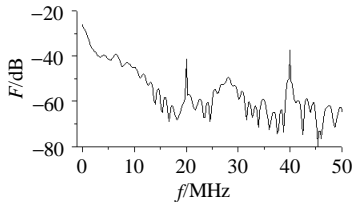


图4 局部放电脉冲的频谱
Fig.4 The spectrum of the partial discharge pulse

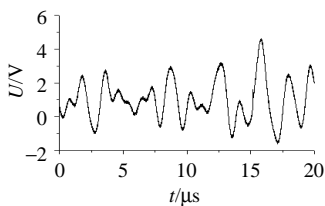


图5 局部放电脉冲和窄带干扰的叠加波形
Fig.5 The sum of partial discharge and simulated narrow frequency noises

3.2 傅立叶级数法抗干扰效果

按照傅立叶级数法的步骤，对图5所示叠加波形进行处理，其中频率 f_i 采用已知数值。若利用图5中0~10 μ s数据带入式(2)求解傅立叶级数的系数，并将系数带入式(1)求 $F(t)$ ，即精确算法，则最终结果 $y(t)$ 几乎与原始脉冲信号一致。不但保留了局放脉冲的低频分量、高频分量、幅值和极性，而且消除了窄带干扰，仅剩原信号所带的随机噪声，信噪

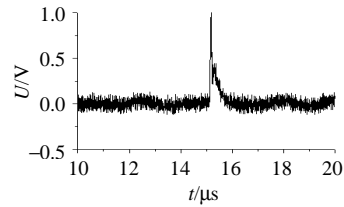


图6 经傅立叶级数法精确算法获取局部放电脉冲
Fig.6 Signal obtained by accurate calculation of Fourier method

比大幅提高，如图6所示。

在实际操作中，需要认真选择不包含局放脉冲的一段干扰波形（如图5中0~10 μ s数据）。例如可以先通过数字高通滤波器或其他传感器得到局放脉冲的位置，再在脉冲附近选择一段无脉冲的数据。这样可最终获得信号的所有信息。而且实践证明这样的无脉冲数据段（视具体情况而定，一般为10 μ s左右）是普遍存在的。

若采用简化算法，例如选择图5中10~20 μ s的数据带入式(2)，最终结果 $y(t)$ 也能够保留原脉冲的幅值、极性和高频分量，但脉冲的低频分量受到削弱，并且脉冲前部有小幅过冲，如图7所示。

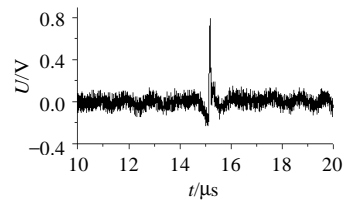


图7 经傅立叶级数法简化算法获取局部放电脉冲
Fig.7 Signal obtained by simple calculation of Fourier method

3.3 随机干扰对抗干扰效果的影响

数据中若存在随机干扰，则傅立叶级数的计算精度会受到影响。但矩阵求解本身所具有的优化性能在很大程度上克服了随机干扰的影响。在图5所示数据的基础上增加幅值为0.5V的随机噪声，然后利用精确算法进行抗干扰处理，其结果如图8所示。某一频道的系数出现了微小的偏差，未能完全抵消。但是，信噪比仍然提高了6倍。

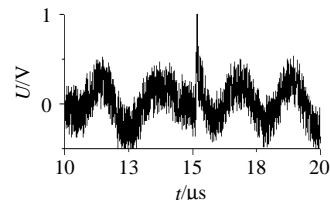


图8 加入0.5V随机干扰时得到的脉冲信号
Fig.8 Signal obtained with 0.5V white noise

3.4 频率误差对抗干扰效果的影响

当利用图 5 中 0~10 μ s 时间段里的数据构建 10~20 μ s 时间段里的窄带干扰时,若频率或相位估计有误差,而该误差具有积累效应,则两数据段的时间间隔越大,估计误差也越大。例如,若给最低频道 260kHz 的估计值加入约 2% 的误差,变为 263kHz,则最终抗干扰结果中 260kHz 正弦波有较大剩余,未被完全抵消,信噪比仅为 0.5,如图 9 所示。

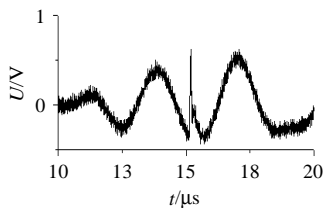


图 9 频率存在 2% 误差时精确算法抗干扰效果

Fig.9 Signal obtained by 0-10ms data with frequency of 2% error

当利用图 5 中 10~20 μ s 时间段里的数据构建 10~20 μ s 时间段里的窄带干扰时,两数据段的时间重合,频率或相位误差不会积累,因而允许更大的频率误差。例如,当在所有 10 个频率数值中都加入 20% 的随机误差,仍然能够得到较好的抗干扰效果,如图 10 所示。甚至某一频率缺失,仅用剩余的 9 个频率进行计算,也能获得一定的抗干扰效果,如图 11 所示 (1060kHz 频率缺失)。可见简化算法对频率误差具有很好的鲁棒性。

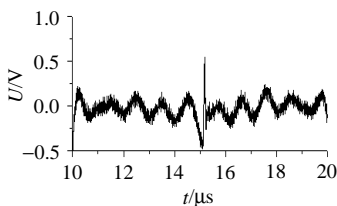


图 10 频率数值均存在 20% 误差时简化算法抗干扰效果

Fig.10 Signal obtained by 10-20ms data with frequency of 20% error

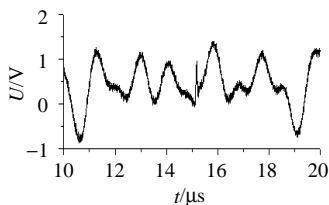


图 11 缺少 1060kHz 频率时简化算法抗干扰效果

Fig.11 Signal obtained by 10-20ms data with frequency of 1060kHz lost

3.5 量化误差对抗干扰效果的影响

信号进入计算机之前,必定经过 A/D 器将模拟信号转换成数字信号。该过程会引入 A/D 转换的

量化误差,可能影响到傅立叶级数的计算精度。

前文所使用的窄带干扰仿真波形峰值达到 6V,进行量化误差为 200mV 的量化处理,即量化误差达到窄带干扰的 3.3%;然后与图 3 所示的局部放电脉冲相叠加,形成混合波形。由于局部放电脉冲由 8 位 A/D 转换器获得,已含有量化误差,因而未作进一步量化处理。用精确算法进行抗干扰处理,窄带干扰仍能被彻底清除,脉冲信号幅值、极性合波形保存完好;用简化算法进行处理,也能获得很好的效果,但是,处理结果中随机干扰增大,其幅值接近量化误差,显然是由量化误差引入的。这些随机干扰能够被低通滤波器清除,简化算法处理结果经 2 阶巴特沃斯低通滤波器处理后如图 12 所示,随机干扰也被消除。因此,普通情况下的量化误差不会对傅立叶级数法抗干扰效果产生不良影响。

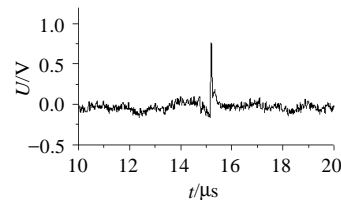


图 12 原始数据存在量化误差时简化算法抗干扰效果

Fig.12 Signal obtained by data with quantization error

4 现场数据验证

本文选用来自某热电厂发电机中性点的窄带干扰和局部放电信号对傅立叶级数法进行了抗干扰效果验证。抗干扰处理前部分原始数据波形见图 13,是由 8 位 A/D 转换精度的横河示波器 DL5410 用 100MS/s 采样率获得的发电机中性点数据。许多脉冲与大约 819kHz、480kHz、91kHz 的窄带干扰重叠在一起,而且窄带干扰的幅值较小。因此,脉冲信号必须从窄带干扰中提取出来,才能进一步分析判断。傅立叶级数法所采用具体处理过程是,首先将原始信号按顺序分成 30 μ s 时间段作为 $f(t)$,然后在每段数据中以 10MS/s 的采样速率选择数据并带入式(2)计算本段数据的 819kHz、480kHz 和 91kHz 三个频道的傅立叶系数,再利用式(1)估计本时间段的窄带干扰 $F(t)$,并计算本段差值 $y(t)$,最后将所有时间段的差值按顺序连接。整个过程历时不到 1s。图 13 中数据经傅立叶级数法简化算法消除干扰后的结果见图 14,信噪比提高了大约 3 倍。脉冲信号也基本保持了原来的幅值和极性。若原始信号中的窄带干扰幅值大,则更能体现抗干扰效果。

将图 13 所示数据进行快速傅立叶变换, 如图 15 所示。由图可知, 脉冲信号的频谱与干扰的频谱非常接近, 甚至低于干扰的频谱, 并且很难区分干扰和信号的谱线。在这种情况下提取脉冲信号是非

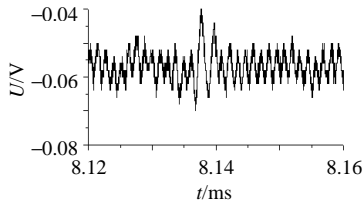


图 13 发电厂原始数据中的脉冲信号

Fig.13 The pulse signal in original data of power plant

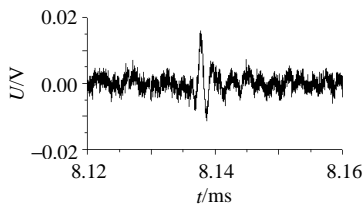


图 14 经傅立叶级数法处理后的脉冲信号

Fig.14 The pulse signal after process of Fourier method

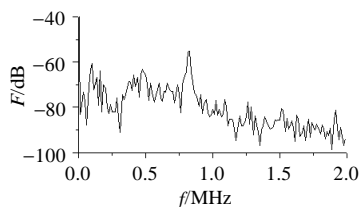


图 15 现场原始数据频谱

Fig.15 The frequency spectrum of original data

常困难的。傅立叶级数法能够提高信噪比, 足见其优越的抗干扰性能。

对于频谱比干扰高得多的脉冲信号, 由于信号与干扰之间从频域上容易区分, 现有各种滤波方法和傅立叶级数法均有很好的效果。但是, 傅立叶级数法不需要随时调整参数, 对于现场中可能出现的各种频段的脉冲均能保留其幅值和极性。究其原因, 傅立叶级数法主要利用了窄带干扰和脉冲信号的时域持续时间差异, 辅以两者频域上的差异, 从而克服了以往仅利用频域差异消除干扰的缺点。

5 与现有抗干扰方法的对比分析

时频转换法也是利用傅立叶变换消除窄带干扰的。首先将含有局放脉冲和干扰的叠加数据转换到频域, 然后将与干扰所对应的陡峭的谱峰削去, 再转回时域, 窄带干扰就消失了。对于现场脉冲波形, 由于其频谱较为复杂, 很难较彻底地消除窄带干扰的谱线。例如, 对于图 13 所示来自现场的数据, 脉冲的频谱与干扰的频谱几乎重合, 难以区分,

无论将谱峰置零或置为基线, 均不能得到局放脉冲, 处理结果如图 16 所示。

自适应滤波法是根据窄带干扰的时间相关性和放电脉冲的时间无关性来滤除窄带干扰的。由于窄带干扰的频率分布范围很广, 该方法在实际应用中, 很难找到合适的参数使算法快速收敛, 甚至不能保证算法收敛; 对于持续时间较长的渐变脉冲和衰减时间较长的振荡脉冲, 自身的相关性很强, 很可能被自身抵消。因此, 这种方法即使能够较好地消除窄带干扰, 也会使脉冲的幅值和波形发生较大变化。对于图 5 所示叠加波, 经多次尝试, 采用 LSM 算法的最佳效果如图 17 所示。与傅立叶级数法结果相对比, 窄带干扰未被完全消除, 而且脉冲幅值减小, 极性也变得难以判断。

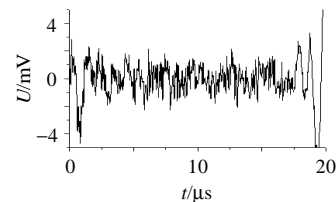


图 16 时频转换法对图 13 数据的处理结果

Fig.16 The result of time-frequency transform method to data in Fig.13

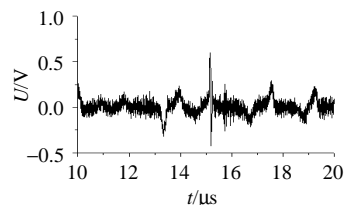


图 17 自适应滤波法对图 5 数据的处理结果

Fig.17 The result of adaptive filter method to data in Fig.5

6 结论

本文提出了利用傅立叶级数消除窄带干扰的新方法。该方法首先利用原始数据估算窄带干扰的频率和傅立叶级数的系数, 然后利用傅立叶系数估算窄带干扰波形, 最后将原始数据与估算结果相减, 则窄带干扰相抵消而局部放电脉冲得到保留。本文通过仿真数据和现场实际数据分析了该方法的抗干扰效果, 并讨论了各种影响因素。分析结果发现该方法能够完全消除窄带干扰, 同时能够保留局部放电脉冲的幅值和极性。随机干扰、频率误差和量化误差都会影响抗干扰效果, 但影响甚微。对仿真数据和实际数据的处理结果表明, 该方法具有良好的抗干扰效果。经过与现有常见

抗干扰方法对比分析, 作者认为傅立叶级数法在保留脉冲信号的波形、幅值和极性特征方面具有明显优势。

参考文献

- [1] Stone G C. The use of partial discharge measurements to assess the condition of rotating machine insulation[J]. IEEE Elect. Insul. Magazine, 1996, 12(4): 23-27.
- [2] Gulski E. Digital analysis of partial discharge[J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 1995, 2(5): 822-837.
- [3] 王晓蓉, 杨敏中, 严璋. 电力设备局部放电测量中抗干扰研究的现状和展望[J]. 电网技术, 2000, 24(6): 41-45.
Wang Xiaorong, Yang Minzhong, Yan Zhang. Review and prospect of rejecting interference in partial discharge measurement of power equipment[J]. Power System Technology, 2000, 24(6): 41-45.
- [4] 杨永明, 孙才新, 高大全, 等. 用直接陷波法抑制局部放电监测系统中周期性干扰的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(3): 62-64, 69.
Yang Yongming, Sun Caixin, Gao Daquan *et al.* The study of periodic interference in partial discharge measurement system by direct trap wave filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(3): 62-64, 69.
- [5] 覃剑, 陈祥训, 郑建超. 连续小波变换在检测强载波干扰中的局放信号的应用[J]. 电网技术, 1998, 22(3): 41-45.
Qin Jian, Chen Xiangxun, Zheng Jianchao. Simulation study on detecting partial discharge in strong carrier disturbance using continuous wavelet transform[J]. Power System Technology, 1998, 22(3): 41-45.
- [6] 淡文刚, 陈祥训, 郑健超. 采用小波分析与神经网络技术的局部放电统计识别方法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(9): 1-6.
Dan Wengang, Chen Xiangxu, Zheng Jianchao. Classification of partial discharge distribution patterns using wavelet transform and neural network[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(9): 1-6.
- [7] 淡文刚, 吕阳, 陈祥训, 等. Bd-小波用于从强电磁干扰中提取局部放电电脉冲信号的研究[J]. 电网技术, 2001, 25(1): 8-12.
Dan Wengang, Lü Yang, Chen Xiangxun *et al.* Research on using bd-wavelet in picking up partial discharge pulse from strong electromagnetic interference[J]. Power System Technology, 2001, 25(1): 8-12.
- [8] 陈祥训. 时域紧支正交复小波及其在电力系统的应用[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(1): 70-73.
Chen Xiangxun. Study of compacted support orthogonal complex wavelet in time domain and its application to power system [J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(1): 70-73.
- [9] Khan S Z. A new adaptive technique for on-line partial discharge monitoring[J]. IEEE Trans. on Dielectric and Electrical Insulation, 1995, 2(4): 700-705.
- [10] 胡明友, 谢恒堃, 蒋雄伟, 等. 基于小波变换抑制局部放电监测中平稳性干扰的滤波器的研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(1): 37-40.
Hu Mingyou, Xie Hengkun, Jiang Xiongwei *et al.* Study on WTST-NST filter used for suppression of stationary noises in PD monitoring [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(1): 37-40.
- [11] 徐淑珍, 陈陈, 刘晓冬, 等. 自适应小波及其在局部放电检测中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(8): 1-4.
Xu Shuzhen, Chen Chen, Liu Xiaodong *et al.* Study of signal-adapted wavelet and its application to PD monitoring[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(8): 1-4.
- [12] 董毅, 曹海翔, 姜建国, 等. 发电机定子绕组局部放电在线监测中来励磁侧的干扰特性的研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(6): 37-41.
Dong Yi, Cao Haoxiang, Jiang Jianguo *et al.* Characteristics of noise from exciter of synchronous machines on-line PD monitoring for stator windings[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(6): 37-41.
- [13] McDermid W, Bromley J C. Experience with directional couplers for partial discharge measurements on rotating machines in operation [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, 14(2): 175-184.
- [14] McDermid W, Bromley J C. Partial discharge screening test for internal voids and delaminations in stator coils and bars[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, 14(3): 292-297.

收稿日期: 2005-04-08.

作者简介:

程养春 (1974-), 男, 副教授, 主要从事电力设备绝缘检测技术的研究;

李成榕 (1957-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事高电压绝缘技术及电磁测量的研究;

王伟 (1960-), 男, 教授, 主要从事高电压绝缘技术及电磁测量的研究.