

抑制局部放电信号中周期性窄带干扰的子空间重构方法

张宇辉¹, 段伟润², 李天云¹

(1. 东北电力大学 电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 国网天津市电力公司, 天津 300010)

摘要: 为有效提取局部放电信号, 提出一种基于子空间重构的窄带干扰抑制方法。对局部放电信号数据形成的 HANKEL 矩阵进行奇异值分解, 将信号划分为窄带干扰子空间和局部放电信号子空间。利用子空间数据重构窄带干扰波形, 然后与原始数据相减, 得到抑制干扰后的局部放电信号。该方法能在保证局部放电信号失真较小的同时有效去除窄带干扰, 抗随机干扰能力较强。仿真和实测信号的处理结果验证了其有效性。

关键词: 局部放电; 窄带干扰; 子空间重构; 奇异值分解; HANKEL 矩阵

中图分类号: TM 835

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.07.027

0 引言

局部放电是造成变压器等电力设备绝缘劣化的重要原因^[1], 局部放电信号的检测对保障电力设备正常运行具有重要意义。现场存在的各种干扰信号(如连续性周期窄带干扰、脉冲干扰、白噪声干扰等)增大了局部放电信号检测难度, 如何削弱这 3 类干扰的影响, 特别是连续性周期窄带干扰, 是提高电力设备绝缘状态监测性能的一个关键问题。

已有学者针对窄带干扰抑制进行了大量研究工作。文献[2-4]采用快速傅里叶变换(FFT)处理局部放电信号中的窄带干扰, 但 FFT 方法受其自身缺陷的影响(如频谱泄漏等)导致消噪效果不够理想。文献[5-8]利用小波、多小波变换良好的时频分析能力, 在抑制窄带干扰方面显示出一定的优势, 但选取合适的小波类型比较困难。经验模态分解完全根据信号自身进行自适应分解, 文献[9-10]将其应用于局部放电信号窄带干扰抑制, 取得了较好效果, 但模态混叠现象使该算法的稳定性和准确性欠佳。集合经验模态分解^[11]削弱了经验模态分解模态混叠现象, 但当局部放电信号频率与叠加的窄带干扰频率接近时, 分解效果不够理想。文献[12-13]采用混沌理论抑制周期性窄带干扰, 失真较小, 对白噪声和局部放电信号本身具有免疫性, 但该方法需预知窄带干扰频率和预置系统周期策动力, 缺乏灵活性。文献[14-15]从估计窄带干扰波形出发, 采用傅里叶级数法抑制局部放电窄带干扰, 其先通过选择参考段进行 FFT 频谱分析, 再计算傅里叶系数, 从而获得窄带干扰估计波形, 该方法较好地保留了局部放电信号的波形及幅值, 但受 FFT 的固有缺陷及随机干扰的影响, 该类算法仍存在局限性。

本文提出一种基于子空间重构的周期性窄带干扰抑制方法。将奇异值分解^[16]与 HANKEL 矩阵^[16]相结合, 对局部放电信号数据形成的 HANKEL 矩阵进

行奇异值分解, 实现窄带干扰子空间和局部放电信号子空间的划分, 在窄带干扰子空间中重构干扰信号, 通过与原始信号相减获得待检测局部放电信号。

1 HANKEL 矩阵与奇异值分解

设局部放电信号的采样序列 $\mathbf{X}$ 为:

$$\mathbf{X} = \{x(1), x(2), \dots, x(k), \dots, x(N)\} \quad (1)$$

$$x(k) = s(k) + n(k) \quad (2)$$

其中, $s(k)$ 为周期性窄带干扰信号; $n(k)$ 为局部放电信号; $k=1, 2, \dots, N$, N 为采样点数。

由采样数据形成如下 HANKEL 矩阵:

$$\mathbf{H}_{p \times q} = \begin{bmatrix} x(1) & x(2) & \cdots & x(q) \\ x(2) & x(3) & \cdots & x(q+1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x(p) & x(p+1) & \cdots & x(N) \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, $H(i, j) = x(i+j-1)$; $p+q-1=N$, $p \geq q$, q 一般在 $N/4 \sim N/3$ 之间取值^[17]。

式(3)可进一步表示为:

$$\mathbf{H}_{p \times q} = \mathbf{H}_s + \mathbf{H}_n = \begin{bmatrix} s(1) & s(2) & \cdots & s(q) \\ s(2) & s(3) & \cdots & s(q+1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ s(p) & s(p+1) & \cdots & s(N) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n(1) & n(2) & \cdots & n(q) \\ n(2) & n(3) & \cdots & n(q+1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ n(p) & n(p+1) & \cdots & n(N) \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, $H_s(i, j) = s(i+j-1)$; $H_n(i, j) = n(i+j-1)$ 。

对构造的 HANKEL 矩阵 $\mathbf{H}$ 进行奇异值分解:

$$\mathbf{H} = \mathbf{U} \mathbf{\Lambda} \mathbf{V}^T = \mathbf{U}_s \mathbf{\Lambda}_s \mathbf{V}_s^T + \mathbf{U}_n \mathbf{\Lambda}_n \mathbf{V}_n^T = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_s & \mathbf{U}_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{\Lambda}_s & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{\Lambda}_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_s & \mathbf{V}_n \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

其中, 正交矩阵 $\mathbf{U} \in \mathbf{R}^{p \times p}$ 、 $\mathbf{U}_s \in \mathbf{R}^{p \times r_s}$ 和 $\mathbf{U}_n \in \mathbf{R}^{p \times r_n}$ 的列向量分别由 $\mathbf{H} \mathbf{H}^T$ 、 $\mathbf{H}_s \mathbf{H}_s^T$ 和 $\mathbf{H}_n \mathbf{H}_n^T$ 的特征向量组成; 正交矩阵 $\mathbf{V} \in \mathbf{R}^{q \times q}$ 、 $\mathbf{V}_s \in \mathbf{R}^{q \times r_s}$ 和 $\mathbf{V}_n \in \mathbf{R}^{q \times r_n}$ 的列向量分别由 $\mathbf{H}^T \mathbf{H}$ 、 $\mathbf{H}_s^T \mathbf{H}_s$ 和 $\mathbf{H}_n^T \mathbf{H}_n$ 的特征向量组成; $\mathbf{\Lambda} \in \mathbf{R}^{p \times q}$ 、 $\mathbf{\Lambda}_s \in \mathbf{R}^{r_s \times r_s}$

和 $\mathbf{A}_n \in \mathbf{R}^{r_n \times r_n}$ 为对角矩阵, 对角元素 $\varepsilon_1 \geq \varepsilon_2 \geq \dots \geq \varepsilon_r \geq 0, \sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_{r_s} \geq 0, \gamma_1 \geq \gamma_2 \geq \dots \geq \gamma_{r_n} \geq 0$ 分别为 HANKEL 矩阵 $\mathbf{H}, \mathbf{H}_s$ 和 $\mathbf{H}_n$ 的奇异值, r, r_s 和 r_n 分别为矩阵 $\mathbf{H}, \mathbf{H}_s$ 和 $\mathbf{H}_n$ 的秩, 且 $r = r_s + r_n$ 。

由式(5)知, $\mathbf{H}_s = \mathbf{U}_s \mathbf{A}_s \mathbf{V}_s^T, \mathbf{H}_n = \mathbf{U}_n \mathbf{A}_n \mathbf{V}_n^T, \mathbf{U} = [\mathbf{U}_s \ \mathbf{U}_n], \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_s & 0 \\ 0 & \mathbf{A}_n \end{bmatrix}, \mathbf{V}^T = [\mathbf{V}_s \ \mathbf{V}_n]^T$ 。因此, 通过获取 $H_s(i, j) = s(i+j-1)$, 可重构出周期性窄带干扰信号 $s(k)$ 。

式(5)可进一步写成:

$$\mathbf{H} = \sum_{i=1}^r \varepsilon_i \mathbf{u}_i \mathbf{v}_i^T = \sum_{i=1}^l \varepsilon_i \mathbf{u}_i \mathbf{v}_i^T + \sum_{i=l+1}^r \varepsilon_i \mathbf{u}_i \mathbf{v}_i^T = \hat{\mathbf{H}}_s + \hat{\mathbf{H}}_n \quad (6)$$

其中, ε_i 为 $\mathbf{H}$ 第 i 个奇异值; $\mathbf{u}_i$ 为 $\mathbf{H}\mathbf{H}^T$ 的第 i 个特征向量; $\mathbf{v}_i$ 为 $\mathbf{H}^T\mathbf{H}$ 的第 i 个特征向量; $\hat{\mathbf{H}}_s$ 和 $\hat{\mathbf{H}}_n$ 分别为 $\mathbf{H}_s$ 和 $\mathbf{H}_n$ 的最佳逼近矩阵。

由上述分析可知, 通过奇异值分解并根据周期性窄带干扰和局部放电信号各自的特点, 即窄带干扰信号 $s(k)$ 与局部放电信号 $n(k)$ 之间的不相关性, 以及窄带干扰信号能量比较集中而局部放电信号能量比较分散的特点, 可以将由局部放电测量信号所构成的 HANKEL 矩阵 $\mathbf{H}$ 分成 2 个互不相关的子空间, 即窄带干扰子空间 $\hat{\mathbf{H}}_s$ 和局部放电信号子空间 $\hat{\mathbf{H}}_n$ 。从 HANKEL 矩阵 $\mathbf{H}$ 中去除 $\hat{\mathbf{H}}_n$ 得到 $\hat{\mathbf{H}}_s$, 进而得到窄带干扰信号 $\hat{s}(k)$ 。

2 窄带干扰子空间和局部放电子空间划分

2 个信号子空间的正确划分对窄带干扰的重构精度至关重要。窄带干扰子空间和局部放电子空间的划分即是求 $\mathbf{H}$ 的有效秩 l 。本文根据奇异值大小判断 l 值, 即满足式(7)的 i 的最大值记为有效秩。

$$\varepsilon_i / \varepsilon_{i+1} > c, \quad \varepsilon_i / \varepsilon_{i-1} < c \quad (7)$$

其中, ε_i 为第 i 个奇异值; c 可根据奇异值变化曲线设置。

3 重构周期性窄带干扰信号

参数 l 的值确定后, 根据奇异值分解逆过程得到 $\hat{\mathbf{H}}_s$, 但 $\hat{\mathbf{H}}_s$ 并不是严格的 HANKEL 矩阵。这里采用对矩阵 $\hat{\mathbf{H}}_s$ 的反对角线元素求平均值的方式, 得到窄带干扰信号在每一时刻的估计值 $\hat{s}(k)$, 即:

$$\begin{cases} \hat{s}(1) = \hat{H}_s(1, 1) \\ \hat{s}(2) = [\hat{H}_s(1, 2) + \hat{H}_s(2, 1)]/2 \\ \vdots \\ \hat{s}(k) = \frac{1}{n-m+1} \sum_{j=m}^n \hat{H}_s(k-j+1, j) \\ \vdots \\ \hat{s}(N) = \hat{H}_s(p, q) \end{cases} \quad (8)$$

其中, $m = \max(1, k-p+1); n = \min(q, k)$ 。

子空间重构抑制周期性窄带干扰的步骤如下:

a. 将采集到的局部放电信号数据形成 HANKEL 矩阵, 对 HANKEL 矩阵进行奇异值分解;

b. 确定参数 l 的值, 划分窄带干扰子空间与局部放电信号子空间;

c. 根据获得的窄带干扰子空间数据, 由式(8)重构窄带干扰波形, 通过与原始信号相减获得待检测局部放电信号。

4 仿真分析和实测处理

4.1 窄带干扰仿真分析

仿真中, 周期性窄带干扰 $f(t)$ 由 4 个不同频率和幅值的正弦波叠加而成, 表达式为:

$$f(t) = k_1 \sin(2\pi l_1 t) + k_2 \sin(2\pi l_2 t) + k_3 \sin(2\pi l_3 t) + k_4 \sin(2\pi l_4 t) \quad (9)$$

其中, $k_i, l_i (i=1, 2, 3, 4)$ 分别为窄带干扰幅值(mV)及频率(kHz)。考虑加入 l_1, l_2, l_3, l_4 分别为 348 kHz、450 kHz、500 kHz、800 kHz 的窄带干扰信号, 各频率成分幅值 k_1, k_2, k_3, k_4 是随机的。采样频率 10 MHz, 其时域波形如图 1 所示, 计算数据窗长度为 0.15 ms。

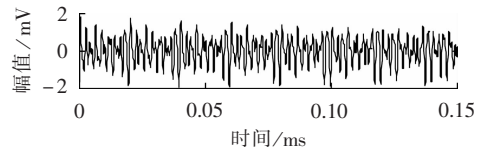


图 1 窄带干扰仿真信号 $f(t)$

Fig.1 Simulative narrowband noises $f(t)$

采集窄带干扰信号数据形成 HANKEL 矩阵, 根据大量仿真实验, 文中 HANKEL 矩阵 q 取为 $N/4, p$ 则取为 $3N/4+1$, 同时为保证计算的快速性, 数据窗长度不宜过长。对 HANKEL 矩阵进行奇异值分解后的奇异值变化曲线如图 2 所示, 从第 9 个奇异值开始无明显变化, 可将 HANKEL 矩阵有效秩取为 8。

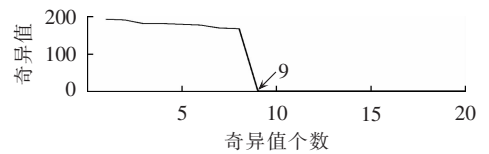


图 2 奇异值变化曲线 1

Fig.2 Curve of singular value(case 1)

采用本文方法重构窄带干扰信号, 并将其与图 1 原始信号相减得到窄带干扰的重构误差, 如图 3 所示。可见, 窄带干扰重构误差在 10^{-13} 数量级上, 重构信号与原始信号基本一致, 验证了子空间重构窄带干扰的可行性。

局部放电信号可用单指数衰减振荡模型和双指数衰减振荡模型描述:

$$Z_1(t) = A_1 e^{-t/\tau} \sin(2\pi f_c t) \quad (10)$$

$$Z_2(t) = A_2 (e^{-1.3t/\tau} - e^{-2.2t/\tau}) \sin(2\pi f_c t) \quad (11)$$

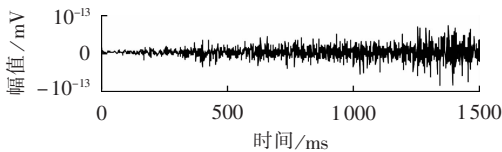


图 3 窄带干扰重构误差

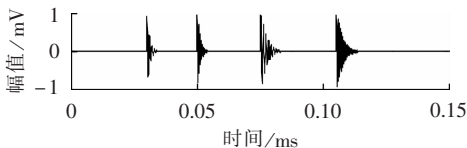
Fig.3 Reconstruction error of narrowband noises

其中, τ 为衰减系数; f_c 为振荡频率; A 为信号幅值。模拟 4 组放电脉冲,参数如表 1 所示。

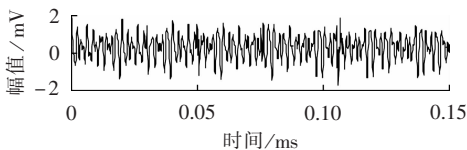
表 1 局部放电信号参数
Table 1 Parameters of PD signals

脉冲序列	f_c/MHz	$\tau/\mu\text{s}$	脉冲序列	f_c/MHz	$\tau/\mu\text{s}$
1	1	1	3	1	2
2	2	1	4	2	2

仿真信号如图 4 所示,其中图 4(a)为理想局部放电信号,幅值为 0.943 9 mV;图 4(b)为叠加图 1 中窄带干扰后的信号,信噪比(SNR)为 -15.035 2 dB。



(a) 理想局部放电信号



(b) 叠加窄带干扰后的信号

图 4 仿真信号

Fig.4 Simulative signals

采集局部放电信号数据形成 HANKEL 矩阵,对其进行奇异值分解后的奇异值变化曲线如图 5 所示,从第 9 个奇异值开始无明显变化,视为局部放电信号分量引起的奇异值。

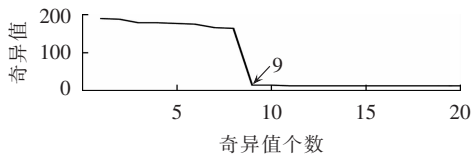


图 5 奇异值变化曲线 2

Fig.5 Curve of singular value(case 2)

此时,可将 HANKEL 矩阵有效秩取为 8。采用本文方法抑制周期性窄带干扰后得到的局部放电信号如图 6 所示,信噪比为 17.733 6 dB。

图 7 为图 6 第 3 组脉冲信号的局部放大图,可以看出,本文方法能够较好地保留局放脉冲的高频分量、低频分量、幅值和极性,有效地抑制窄带干扰。

作为参考,分别用傅里叶级数法^[14]、小波消噪方法^[5]和多小波消噪方法^[6]对上述数据进行分析。表 2 为

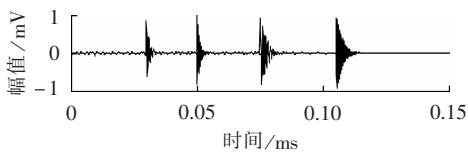


图 6 抑制周期性窄带干扰后的局部放电信号

Fig.6 PD signals after periodic narrowband noise suppression

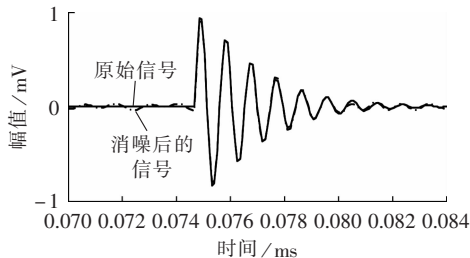


图 7 局部放电信号提取结果

Fig.7 Extracted PD signals

采用傅里叶级数法时窄带干扰频率 FFT 估计值。

表 2 FFT 频率估计值

Table 2 Estimated frequencies by FFT kHz

精确值	估计值	精确值	估计值
348	346.67	500	500
450	448.66	800	800

图 8 为采用傅里叶级数法消除窄带干扰后的局部放电波形,信噪比为 -3.091 8 dB。由表 2 及图 8 的消噪结果可知,FFT 算法本身的固有缺陷导致窄带干扰波形未能完全抵消,进而影响了结果的准确性。

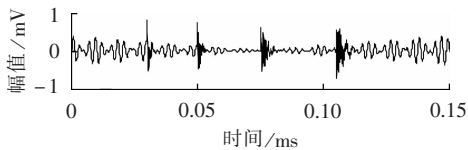


图 8 经傅里叶级数法提取的局部放电信号

Fig.8 PD signals extracted by Fourier series

图 9 上、下波形分别对应小波消噪和多小波消噪处理结果,信噪比分别为 0.700 6 dB 和 2.506 4 dB。

比较图 6、图 8 和图 9 可知:小波和多小波方法将放电信号的部分信息和窄带干扰一起消除,导致放电信号的幅值和波形等发生严重变化;傅里叶级数方法在一定程度上抑制了窄带干扰,保留了放电

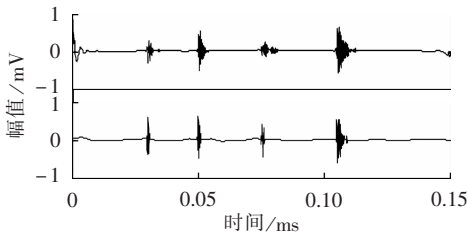


图 9 小波和多小波处理结果

Fig.9 PD signals extracted by wavelet and multi-wavelet

信号的主要特征,但受 FFT 算法本身固有缺陷的影响,消噪效果不够理想;本文方法通过求解窄带干扰子空间数据来重构窄带干扰波形,避免了傅里叶级数方法频率估计引起的误差,自适应逼近能力较强。

通过不同的 k_i 和 l_i 值组合,验证本文方法抑制窄带干扰信号的有效性,参数如表 3 所示。

表 3 窄带干扰参数					
Table 3 Parameters of narrowband noises					
样本序号	k_1/l_1	k_2/l_2	k_3/l_3	k_4/l_4	信噪比/dB
1	0.2/146	0.2/210	0.6/320	0.7/480	-14.7265
2	0.5/350	0.5/400	0.2/800	0.2/980	-12.6705
3	0.2/850	0.2/1050	0.2/1200	0.2/1560	-7.0774
4	0.7/500	0.7/700	0.7/900	0.7/1800	-17.9587
5	1.2/500	1/600	1.2/700	1/800	-21.9104

本文方法与傅里叶级数法、小波和多小波方法的评价参数对比结果如表 4 所示。

表 4 评价参数计算结果				
Table 4 Comparison of performances among different methods				
样本序号	信噪比/dB			
	方法 1	方法 2	方法 3	方法 4
1	24.5514	0.9506	1.7877	1.6740
2	13.1154	-6.7389	1.9978	2.6410
3	14.0793	-1.9261	1.8593	2.9655
4	15.5094	23.7646	-2.2732	-2.9381
5	16.4136	20.1353	-4.1931	-1.0816

样本序号	均方误差			
	方法 1	方法 2	方法 3	方法 4
1	5.4981×10^{-5}	0.0126	0.0104	0.0107
2	7.6527×10^{-4}	0.0740	0.0099	0.0085
3	6.1294×10^{-4}	0.0244	0.0102	0.0079
4	4.4098×10^{-4}	6.5901×10^{-5}	0.0265	0.0308
5	3.5809×10^{-4}	1.5199×10^{-4}	0.0412	0.0201

注:方法 1 为本文方法;方法 2 为傅里叶级数法;方法 3 为小波消噪方法;方法 4 为多小波消噪方法。

从第 4、5 组样本评价参数对比结果中可以看出,相比于小波和多小波方法,本文方法和傅里叶级数法在抑制窄带干扰方面具有一定的优势;从这 5 组样本评价参数对比结果中可以看出,本文方法在抑制窄带干扰的稳定性和准确性上面,整体上优于傅里叶级数法、小波和多小波方法。

在图 4(b)数据的基础上,考虑局部放电信号的衰减系数 τ 在 100 ns~2.5 μ s (步长为 50 ns) 范围内动态变化对本文方法抑制窄带干扰效果的影响。

从图 10 可以看出,在整个衰减系数变化范围内,

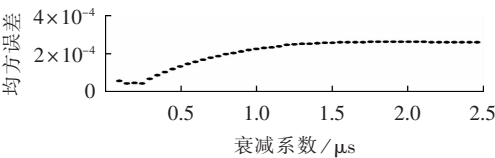


图 10 均方误差变化曲线
Fig.10 Curve of mean square error

均方误差在 10^{-4} 数量级上,本文方法较好地保留了局放波形的振荡特征。

4.2 随机干扰对抗干扰效果的影响

在图 4(b)所示数据的基础上增加方差为 0.2 的随机噪声,利用本文方法进行抗干扰处理。对局部放电信号形成的 HANKEL 矩阵进行奇异值分解后的奇异值变化曲线如图 11 所示,从第 9 个奇异值开始无明显变化,视为局部放电信号和随机噪声分量引起的奇异值。

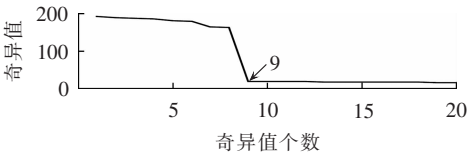


图 11 奇异值变化曲线 3
Fig.11 Curve of singular value(case 3)

将 HANKEL 矩阵有效秩取为 8,窄带干扰抑制结果如图 12 所示。可见,窄带干扰得到了很好的抑制,剩余干扰主要为白噪声,信噪比为 -3.6617 dB。

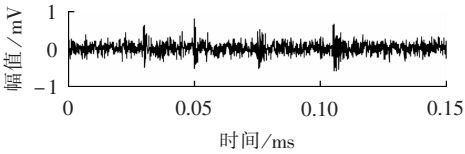


图 12 抑制周期性窄带干扰后的局部放电信号
Fig.12 PD signals after periodic narrowband noise suppression

图 13 给出了采用傅里叶级数法消除窄带干扰后的局部放电波形,信噪比为 -6.4432 dB。

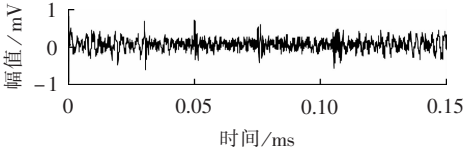


图 13 经傅里叶级数法提取的局部放电信号
Fig.13 PD signals extracted by Fourier series

由于随机干扰并不满足 Dirichlet 条件,傅里叶级数无法对其重构,因此引入了计算误差,再加上 FFT 频率估计偏差的影响导致窄带干扰波形不能完全抵消,信噪比较低。

4.3 现场实测数据分析

图 14 为某变电站现场所采集到的一段局部放电信号数据,由于获取的局部放电信号窄带干扰不太明显,故在检测到的信号中加入式(9)形式的窄带

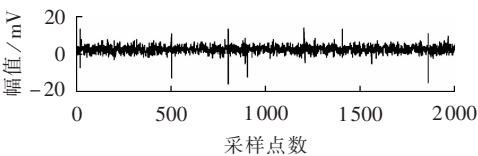


图 14 实测信号
Fig.14 Measured PD signals

干扰,初始相位随机设置为 60° 、 30° 、 -45° 、 70° ,叠加干扰后的信号如图 15 所示。

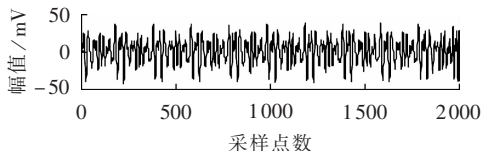


图 15 加入窄带干扰后的信号
Fig.15 PD signals mixed with periodic narrowband noises

将图 15 的局部放电信号数据形成 HANKEL 矩阵,对其进行奇异值分解后的奇异值变化曲线如图 16 所示,HANKEL 矩阵有效秩取为 8。

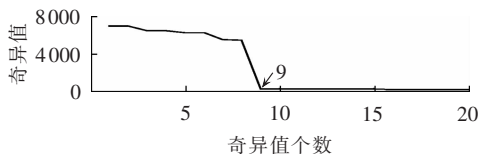


图 16 奇异值变化曲线 4
Fig.16 Curve of singular value(case 4)

采用本文方法抑制窄带干扰后的局部放电波形如图 17 所示。

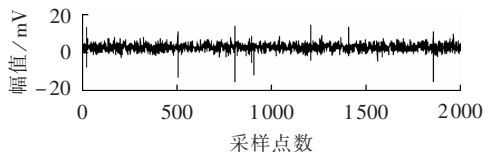


图 17 抑制周期性窄带干扰后的局部放电信号
Fig.17 PD signals after periodic narrowband noise suppression

表 5 为采用傅里叶级数法时,窄带干扰频率 FFT 估计值,抑制窄带干扰后的局部放电波形见图 18。

表 5 FFT 频率估计值

Table 5 Estimated frequencies by FFT kHz

精确值	估计值	精确值	估计值
300	300	500	500
347	345	680	680

比较图 14、图 17 和图 18 可知,本文提出的抑制局部放电周期性窄带干扰方法可以有效抑制窄带干扰,很好地保留了局部放电脉冲。从图 18 中可以看出,傅里叶级数法能在一定程度上抑制窄带干扰,但在估计 347 kHz 频率分量时,FFT 发生了谱峰偏移,再加上随机干扰的影响,导致抗干扰效果不够理想。

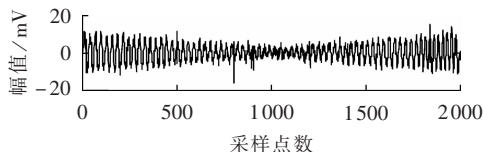


图 18 经傅里叶级数法提取的局部放电信号
Fig.18 PD signals extracted by Fourier series

5 结论

局部放电信号的多态性及频谱具有几乎分布在整个频率区间上的特点,使基于波形匹配或频带划分的窄带干扰抑制方法存在适用局限性。仿真和实测信号处理结果表明:

a. 从估计窄带干扰信号波形出发,逆向分析局部放电信号,能够有效抑制窄带干扰,更好地保留局部放电脉冲的高频分量、低频分量、幅值等信息;

b. 本文提出的基于子空间重构的窄带干扰抑制方法,从矩阵的角度出发,利用窄带干扰信号能量比较集中、局部放电信号和随机干扰信号能量比较分散的特点,划分窄带干扰信号子空间和局部放电信号子空间(含随机干扰),通过子空间数据重构窄带干扰波形,相比于傅里叶级数法,方法简单、鲁棒性强,较适合实际使用,为局放信号窄带干扰抑制提供了一种新的选择。

参考文献:

- [1] 苑津莎,尚海昆. 基于主成分分析和概率神经网络的变压器局部放电模式识别[J]. 电力自动化设备,2013,33(6):27-31.
YUAN Jinsha,SHANG Haikun. Pattern recognition based on principal component analysis and probabilistic neural networks for partial discharge of power transformer[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(6):27-31.
- [2] 谢良聘,朱德恒. FFT 频域分析算法抑制窄带干扰的研究[J]. 高电压技术,2000,26(4):6-8.
XIE Liangpin,ZHU Deheng. Research of spectrum analysis based on FFT for suppressing narrowband interference in PD signal[J]. High Voltage Engineering,2000,26(4):6-8.
- [3] 卢毅,韩志锟,陈瑜. 基于能量比预处理的 FFT 窄带滤波方法[J]. 东南大学学报(自然科学版),2010,40(5):948-951.
LU Yi,HAN Zhikun,CHEN Yu. FFT narrow band filtering method based on energy ratio pretreatment[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition),2010,40(5):948-951.
- [4] 罗新,牛海清,胡日亮,等. 一种改进的用于快速傅里叶变换功率谱中的窄带干扰抑制的方法[J]. 中国电机工程学报,2013,33(12):167-175.
LUO Xin,NIU Haiqing,HU Riliang,et al. A modified method of suppressing narrow-band interference using fast Fourier transform power spectrum[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(12):167-175.
- [5] ZHENG Wei,ZHOU Xichao,XU Honglei,et al. Partial discharge signal obtain based on adaptive wavelet with mathematical morphology[J]. Physics Procedia,2012,24(Part B):912-917.
- [6] 钱勇,黄成军,陈陈,等. 多小波消噪算法在局部放电检测中的应用[J]. 中国电机工程学报,2007,27(6):89-95.
QIAN Yong,HUANG Chengjun,CHEN Chen,et al. Application of multi-wavelet based on de-noising algorithm in partial discharge detection[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(6):89-95.
- [7] 李化,杨新春,李剑,等. 基于小波分解尺度系数能量最大原则的 GIS 局部放电超高频信号自适应小波去噪[J]. 电工技术学报,2012,27(5):84-91.
LI Hua,YANG Xinchun,LI Jian,et al. The maximum energy of

- wavelet decomposition approximation-related adaptive wavelet denoising for partial discharge UHF pulse in GIS[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2012,27(5):84-91.
- [8] 刘卫东,刘尚合. 基于小波分解与滑动峰态的微弱放电信号联合检测方法[J]. 电力自动化设备,2016,36(11):152-156,164.
LIU Weidong,LIU Shanghe. Weak partial discharge signal detection based on wavelet decomposition and sliding kurtosis[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(11):152-156,164.
- [9] 沈宏,张蒲,徐其惠,等. 改进自适应噪声对消算法的窄带干扰抑制[J]. 仪器仪表学报,2008,29(12):2632-2636.
SHEN Hong,ZHANG Pu,XU Qihui,et al. Narrow-band interference suppression based on improved adaptive noise cancellation algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2008,29(12):2632-2636.
- [10] 戴怀刚,李清志. 改进的 EMD 方法在局部放电信号提取中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报,2014,26(11):78-81.
ZANG Huaigang,LI Qingzhi. Application of improved EMD method on extraction of partial discharge signal[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2014,26(11):78-81.
- [11] 姚林朋,郑文栋,钱勇,等. 基于集合经验模态分解的局部放电信号的窄带干扰抑制[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(22):133-139.
YAO Linpeng,ZHENG Wendong,QIAN Yong,et al. A narrow-band interference suppression method based on EEMD for partial discharge[J]. Power System Protection and Control,2011,39(22):133-139.
- [12] 李楠,廖瑞金,孙才新,等. 一种用混沌振子去除局部放电信号中窄带干扰的新方法[J]. 电工技术学报,2006,21(2):88-92.
LI Nan,LIAO Ruijin,SUN Caixin,et al. A new suppression method for narrow-band interference in partial discharge signals with chaotic oscillator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2006,21(2):88-92.
- [13] 舒娜,张晓星,孙才新,等. 采用 Van-der 混沌振子抑制局部放电信号中周期性窄带干扰[J]. 高电压技术,2012,38(1):89-94.
SHU Na,ZHANG Xiaoxing,SUN Caixin,et al. Van-der chaotic oscillator to suppressing the periodic narrow-band interference from partial discharge pulse signal[J]. High Voltage Engineering,2012,38(1):89-94.
- [14] 程养春,李成榕,王伟. 用傅立叶级数法消除局部放电检测中窄带干扰的研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(20):106-111.
CHENG Yangchun,LI Chengrong,WANG Wei. Research on eliminating narrow frequency noise by Fourier series in partial discharge detection[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(20):106-111.
- [15] 刘卫东,刘尚合,魏明. 抑制周期性窄带干扰的时域重构优化算法性能分析[J]. 高电压技术,2010,36(5):1211-1216.
LIU Weidong,LIU Shanghe,WEI Ming. Analysis of the optimization reconstruction method in time domain for periodic narrowband interference eliminating[J]. High Voltage Engineering,2010,36(5):1211-1216.
- [16] 张贤达. 矩阵分析与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [17] 张宇辉,陈峰,李慧敏,等. 基于小波变换和矩阵束算法的同步电机参数辨识[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(9):87-92.
ZHANG Yuhui,CHEN Feng,LI Huimin,et al. Parameter identification of synchronous machine based on wavelet transform and matrix pencil algorithm[J]. Power System Protection and Control,2012,40(9):87-92.

作者简介:



张宇辉

张宇辉(1962—),男,吉林吉林人,副教授,从事自动控制理论、信号处理在电力系统中的教学与应用研究工作;

段伟润(1987—),男,黑龙江绥化人,工程师,硕士,主要研究方向为电力系统中的非平稳工程信号处理(E-mail:angelrain@126.com);

李天云(1945—),男,吉林吉林人,朝鲜族,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。

Subspace reconstruction to suppress periodic narrowband noises of partial discharge signals

ZHANG Yuhui¹, DUAN Weirun², LI Tianyun¹

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China;

2. State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300010, China)

Abstract: A method based on subspace reconstruction is proposed to suppress the periodic narrowband noises for extracting the effective PD(Partial Discharge) signals. Singular value decomposition is performed to divide the HANKEL matrix consisting of original PD data into the periodic narrowband noise subspace and the PD signal subspace. The data of periodic narrowband noise subspace are used to reconstruct the waveform of periodic narrowband noises, which is then subtracted from the original PD data. The proposed method, with better resistance to random interferences, can effectively filter out the periodic narrowband noises while ensure a smaller distortion of PD signals. Simulative and measured PD data are applied to verify its effectiveness.

Key words: partial discharge; narrowband noise; subspace reconstruction; singular value decomposition; HANKEL matrix