

# 基于自适应滤波的信号分离与窄带干扰抑制

陈昊<sup>1</sup>, 廖英祺<sup>2</sup>, 张连芹<sup>1</sup>, 蒋旻奕<sup>1</sup>, 徐懂理<sup>3</sup>, 蒋增林<sup>3</sup>

(1. 国网江苏省电力有限公司检修分公司, 江苏 南京 211102; 2. 国网南京供电公司, 江苏 南京 210019; 3. 南京工程学院电力工程学院, 江苏 南京 211167)

**摘要:** 变电站复杂的电磁环境有时会对变电站电气试验工作产生干扰。基于对干扰信号的分析, 讨论了自适应滤波器的基本原理, 围绕最小均方误差准则以及最小均方(LMS)算法, 设计了一种自适应信号分离器, 并基于自适应信号分离器研究了低频窄带干扰抑制, 利用快速傅里叶分解(FFT)进行了频域分析, 进而实现了窄带干扰抑制, 研制了一种变电站用电磁环境净空间生成装置。实验仿真结果验证了所提设计的可行性和装置的有效性, 南京地区 220 kV 以上变电站的现场试验表明, 基于该方法研制的变电站用电磁净空间生成装置能可靠抑制干扰信号, 有效提升试验效率。

**关键词:** 自适应滤波器; 信号分离器; 窄带干扰抑制; 频域分析

中图分类号: TN972

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2019)02-0129-06

## 0 引言

特高压、超高压变电站含有多电压等级, 带电设备繁多, 特征多样, 站内电磁环境复杂<sup>[1-3]</sup>, 变电站设备在线监测<sup>[4-9]</sup>、电气试验<sup>[10-12]</sup>工作中常会遭遇各种干扰信号。有时这些干扰甚为显著, 可能对监测、试验结果造成不利影响。常规的应对措施是采用干扰抑制器, 目前研究中常用的干扰抑制器是陷波器, 对特定频率的信号有着很强的衰减, 即阻带带宽极窄的带阻滤波器。在常规的数字滤波器设计<sup>[13-15]</sup>中, 通常把阶数选的足够高实现某一频率的显著衰减, 但同时计算量也变得更大, 而且设计过程复杂, 难以适时跟踪变电站电磁环境变化进行动态调整。因此, 为提升干扰抑制效果, 改善变电站设备在线监测、电气试验工作质量, 亟需设计一种适用于变电站电磁环境的自适应干扰抑制器。

考虑到变电站电磁环境中的窄带干扰<sup>[13-14]</sup>, 以及自适应噪声消除器在无线通信领域的成功应用, 针对变电站干扰源以低频为主的特点提出了一种基于最小均方算法(LMS)的自适应干扰抑制方法, 设计了一种电磁净空间生成装置, 基于自适应信号分离器抑制变电站电磁环境窄带干扰。

## 1 自适应滤波器的基本原理

自适应信号分离器<sup>[16-17]</sup>实质是一种自适应滤波器, 在整个输入过程的统计特性不明或动态变化时, 通过特定的算法进行计算之后动态调整自身参

数, 以满足某种准则(如最小均方误差准则)的要求, 进而得出滤波后有用的输入信号估计值及滤波器所滤除的误差信号。当输入过程的统计特性动态变化时, 自适应滤波器动态调整自身参数加以跟踪, 使输出信号达到最优。自适应滤波器结构如图 1。

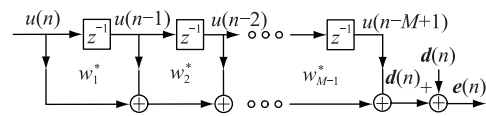


图 1 自适应滤波器典型结构

Fig.1 the typical structure of adaptive filter

### 1.1 最小均方误差准则

定义估计误差为:

$$e(n) = d(n) - \hat{d}(n) = d(n) - \mathbf{w}^H \mathbf{u}(n) = d(n) - \mathbf{u}^T(n) \mathbf{w}^* \quad (1)$$

式中:  $d(n)$ ,  $\hat{d}(n)$  为预处理信号及输入信号的估计值;  $\mathbf{u}(n)$  为滤波输入信号;  $\mathbf{w}$  为滤波器系数阵。定义估计误差的平均功率为:

$$\begin{cases} J(\mathbf{w}) = E\{|e(n)|^2\} = E\{e(n)e^*(n)\} = \sigma_d^2 - \mathbf{P}^H \mathbf{w} - \mathbf{w}^H \mathbf{P} + \mathbf{w}^H \mathbf{R} \mathbf{w} \\ \sigma_d^2 = E\{|d(n)|^2\} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{P}$  和  $\mathbf{R}$  分别为互相关向量矩阵和自相关向量矩阵。此时为求得平均功率  $J(\mathbf{w})$  的最小值, 即令:

$$\frac{\partial}{\partial (\mathbf{w}^*)} [J(\mathbf{w})] = -\mathbf{P} + \mathbf{R} \mathbf{w} = \mathbf{0} \quad (3)$$

得到维纳霍夫方程  $\mathbf{R} \mathbf{w} = \mathbf{P}$ 。此处,  $\mathbf{R}$  总是非奇异的, 因此可求出  $\mathbf{w}$ 。又根据正交原理得:

$$E\{\mathbf{u}(n)e_0^*(n)\} = 0 \quad (4)$$

$J(\mathbf{w})$ 取得极小值的充要条件是对应的估计误差  $\mathbf{e}_0(n)$  与  $n$  时刻的每个抽头的输入样本在统计意义上相互正交。代入  $\mathbf{w}$ , 利用自相关矩阵的对称性化简得:

$$\mathbf{J}_{min} = \sigma_d^2 - \sigma_n^2 \quad (5)$$

## 1.2 LMS 算法

LMS 算法<sup>[7]</sup>是最陡下降法的一种,即采用  $n$  时刻的瞬时估计值  $\hat{\mathbf{R}}, \hat{\mathbf{P}}, \hat{\mathbf{w}}(n)$ , 代替上节的  $\mathbf{R}, \mathbf{P}, \mathbf{w}$ , 即有:

$$-\hat{\mathbf{P}} + \hat{\mathbf{R}}\hat{\mathbf{w}}(n) = -\mathbf{u}(n)\mathbf{e}^*(n) \quad (6)$$

LMS 算法步骤如下:

步骤 1: 初始化,  $n=0$ ;

权向量:  $\hat{\mathbf{w}}(0) = \mathbf{0}$ ;

估计误差:  $\mathbf{e}(0) = \mathbf{d}(0) - \hat{\mathbf{d}}(0) = \mathbf{0}$ ;

输入向量:

$$\mathbf{u}(0) = [\tilde{u}(0), \tilde{u}(-1), \dots, \tilde{u}(-M+1)]^T = [\tilde{u}(0), 0, \dots, 0]^T \quad (7)$$

步骤 2: 对  $n=0, 1, 2, \dots$  权向量的更新:

$$\hat{\mathbf{w}}(n+1) = \hat{\mathbf{w}}(n) + \mu\mathbf{u}(n)\mathbf{e}^*(n) \quad (8)$$

式中:  $\mu$  为动态调整系数。期望信号的估计:

$$\hat{\mathbf{d}}(n+1) = \hat{\mathbf{w}}^H(n+1)\mathbf{u}(n+1) \quad (9)$$

估计误差:

$$\mathbf{e}(n+1) = \mathbf{d}(n+1) - \hat{\mathbf{d}}(n+1) \quad (10)$$

步骤 3: 令  $n=n+1$ , 转移到步骤 2。

## 2 自适应信号分离器的设计

信号接收的同时往往伴随着干扰和噪声, 影响接收信号的可靠性, 导致误码率的上升。自适应信号处理利用最优滤波器从受到噪声和干扰污染的信号中估计、检测或恢复出原始信号, 例如经典的维纳滤波器和卡尔曼滤波器。最优滤波器可以是固定的, 也可以是自适应的, 其中设计固定滤波器依赖于信号和噪声的先验统计知识, 而自适应滤波器则不需要或很少有关信号噪声的先验知识。经典的自适应噪声消除 (ANC) 系统是自适应最优滤波器的一种重要形式, 但 ANC 要求输入的参考信号是与噪声相关的。然而, 在电气试验等领域中, 寻找与噪声有较好相关性的参考信号是非常困难的, 使 ANC 难以直接实现。考虑到宽带信号中的噪声往往是周期性的, 虽然没有与噪声相关的参考信号, 但可以借助自适应噪声抵消系统实现这种周期性干扰噪声的消除与抑制。

在图 2 中, 虚线框中的部分为自适应噪声抵消

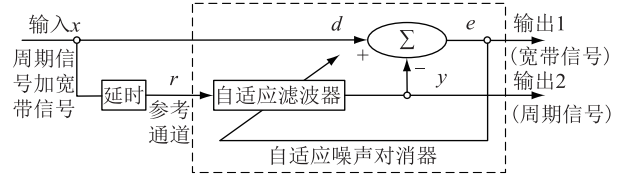


图 2 周期信号与宽带信号的分离

Fig.2 The division of periodical signal and board signal

系统结构, 原始输入为周期信号和宽带信号的混合。输入信号直接送入主通道, 同时经过一个延时电路送入参考通道。延时足够长, 使得参考信道输入  $r$  中的宽带信号与  $x$  中的宽带信号不相关或者相关性极低。而在  $x$  和  $r$  中的周期信号因其周期性特征, 其相关性也呈现周期性, 经过延时之后, 其相关性保持不变。进一步经过自适应噪声抵消系统处理, 参考通道中的自适应滤波器将动态调整其权重, 使输出  $y$  在最小均方误差意义上接近相关分量 (周期信号), 而误差接近非相关分量 (宽带信号)。从而得到 2 个输出, 输出 1 主要包含宽带信号, 输出 2 主要包含周期信号。

基于 LMS 自适应滤波算法设计一种自适应信号分离器, 用以从输入信号中提取周期信号。参考通道延迟设为 50。不失一般性, 给定输入信号为幅值为 1 个单位的白噪声信号, 如图 3。从中选取正弦周期信号  $s = \sin(2\pi t/10)$ , 可得到剩余的宽带噪声信号, 该信号为高斯白噪声, 如图 3 所示。

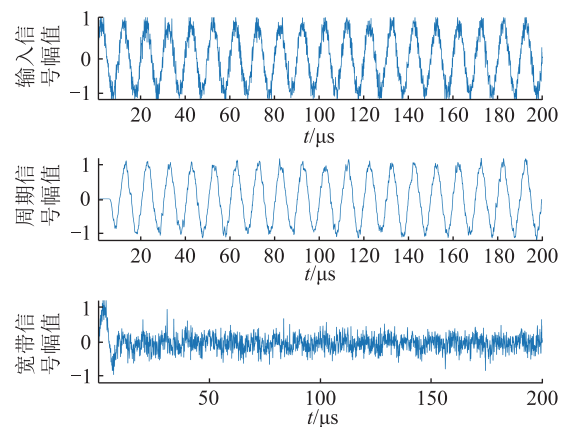


图 3 自适应信号分解的仿真

Fig.3 Simulation of the adaptive signal division

## 3 自适应信号分离器在抑制窄带干扰中的应用

利用窄带干扰的功率谱集中于很窄的一个频带或若干个可列频带<sup>[17]</sup>, 表现特征为脉冲形状, 运用陷波的方式从接收信号中去除干扰所在频带信息, 对于抑制变电站工频或其他低频干扰信号尤为

合适。如使用 FFT 变换将传输数据映射至频域,通过去掉干扰所在频率位数据来抑制强窄带干扰。基于快速傅里叶变换的抗窄带干扰原理见图 4。



图 4 滤波器原理

Fig.4 Principle graph of filter

为避免在较宽频带范围内的干扰能量泄露,采用窗函数对叠加干扰信号做变换处理,进行傅里叶变换,与某一合适滤波器相乘,对处理结果再作傅里叶反变换回到时域。 $r(t)$  为接收信号, $S(t)$  为需要传输的信号, $W(t)$  为防止干扰能量外泄的窗函数。其中接收信号由三部分组成: $S(t)$ ;  $n(t)$  为加性高斯自噪声; $i(t)$  为窄带干扰。设窄带干扰内有  $n$  个点(即  $N+1, N+2, \dots, N+n$ ) 被滤掉,则使用与该频率段相邻的前  $n$  个点(即  $N-n+1, N-n+2, \dots, N$ ) 及其与相邻该频率段的后  $n$  个点( $N+n+1, N+n+2, \dots, N+2n$ ) 作中值滤波,则:

$$S(N+i) = \frac{1}{2} [S(N-n+i) + S(N+n+i)] \quad (11)$$

用上式中的  $n$  个数据来代替被滤出的  $n$  个点,处理中假设前  $n$  个点和后  $n$  个点中没有窄带干扰。因为干扰频带一般定位在干扰频率最大幅值点附近 4~6 kHz 范围,同时采用插值补偿,故该算法对需要传输信号的时域波形畸变很小。

对于窄带干扰信号共记录  $n$  点样值。如下式:

$$i(nT) = \sum_{m=1}^M A_m \cos(2\pi f_m nT + \varphi_m) \quad (12)$$

式中:  $T = 1/f$ , 为采样时间间隔。采样频率为  $f_s$  的  $N$  点 FFT 的频率分辨率为:

$$\Delta f = f_s/N \quad (13)$$

各组成信号的频率可以表示为:

$$f_m = \lambda_m \Delta f = (l_m + \delta_m) \Delta f \quad (14)$$

式中:  $\lambda_m = (l_m + \delta_m)$  为第  $m$  个窄带干扰的基频倍数,取为整数;  $l_m, \delta_m$  为基频倍数的 2 个成分。为简化演算过程,利用 Dirichlet 函数:

$$\sum_{m=0}^{N-1} W_N^{mn} = \frac{\sin(\pi n)}{\sin(\pi n/N)} e^{-j\pi n(N-1)/N} \quad (15)$$

$i(KT)$  的 DFT 变换可表示为:

$$\begin{cases} I(k) = -0.5jAe^{j[a(\lambda-k)+\varphi]} \frac{\sin\pi(\lambda-k)}{\sin(\lambda-k)/N} - \\ e^{j2(\pi+k)+\varphi} \frac{\sin(\pi+k)}{\sin(\pi+k)/N} \\ \lambda = l + \delta \\ \alpha = \pi(N-1)/N \end{cases} \quad (16)$$

式中:  $l, \delta$  为第 1 个窄带干扰的基频倍数的 2 个成分。中心频率  $f$  按下式计算:

$$\begin{cases} f = (1 + \delta) \Delta f \\ \delta = \frac{\alpha}{1 + \alpha} \\ \alpha = \frac{|I(l+1)|}{|I(l)|} \end{cases} \quad (17)$$

要计算频率,要求干扰信号幅值  $|I(l)|$  和  $|I(l+1)|$ , 而接收信号  $r(t)$  经 FFT 变换的幅值为  $R(k)$ 。根据频率谱分析结果,在加有窄带干扰的频率部分,窄带干扰平均幅值  $|R_i(k)|$  远大于需要传输信号平均幅值  $\bar{S}_i(k)$ , 因而下面的关系式近似成立。

$$|\bar{R}_i(l+v)| \approx |\bar{S}_i(l+v)| \approx |\bar{S}_i(l)| \quad (18)$$

式中:  $v$  为小值整数。其选择方法如下:

$$v = \begin{cases} [10\delta] & 0 \leq \delta < 0.5 \\ [10(1-\delta)] & 0.5 \leq \delta < 1 \end{cases} \quad (19)$$

式中:  $[10\delta], [10(1-\delta)]$  表示取整,  $\delta$  为:

$$\delta = \frac{R_i(l+1)/R_i(l)}{1 + R_i(l+1)/R_i(l)} \quad (20)$$

综合以上各式可得:

$$I_i(l+1) = \bar{R}_i(l+1) \sqrt{1 - \frac{|\bar{R}_i(l+1+v)|^2}{|\bar{R}_i(l+1)|^2}} \quad (21)$$

将  $I_i(l)$  和  $I_i(l+1)$  的估计值代入,可获得中心频率  $f$  的计算值。变电站实际电磁环境中,除 50 Hz 工频外,可能同时存在多个窄带干扰,即  $m > 1$ 。可以利用同样的原理得到  $l_m$  与  $\delta_m$ , 从而计算出中心频率  $f_m$ 。干扰带宽可按式估计:

$$\Delta B_m = N_m \Delta f \quad (21)$$

式中:  $N_m$  为第  $m$  个干扰所占频率位。

使用改进 FFT 变换在频域对宽带扩频信号中的正弦干扰信号(时域幅值为  $A$ ) 进行识别和抑制,其中扩频信号由  $N = 1024$  点的伪随机序列表示。经归一化后(放缩系数为  $2/A \times N$ ),可获得初始窄带干扰如图 5 所示。图 5 中横坐标为频域的信号频率信息,纵坐标为频域幅值。进而运用文中所提方法对窄带干扰进行抑制,可直观看出该方法对图中 4 处窄带频率点信号(130 Hz, 90 Hz, 650 Hz, 900 Hz) 的抑制效果,如图 6 所示。

## 4 实际应用

### 4.1 窄带干扰抑制器的设计

基于窄带干扰抑制原理,设计窄带干扰器,其

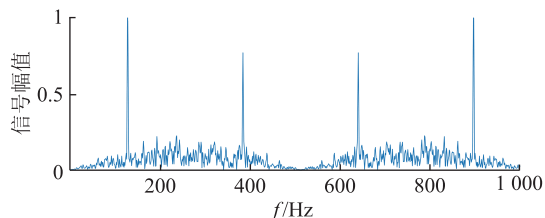


图5 初始的窄带干扰

Fig.5 Initial narrowband interference

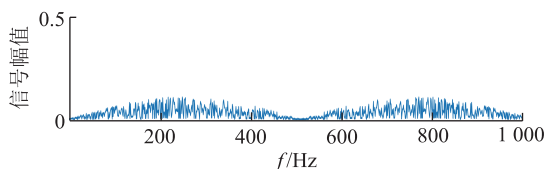


图6 抑制后的窄带干扰

Fig.6 The suppressed narrowband interference

系统组成原理如图7所示,包括窄带信号检测探头、信号调理电路、环境检测、STM32F103CBT6处理器、信号输出电路、信号发射天线等部分。

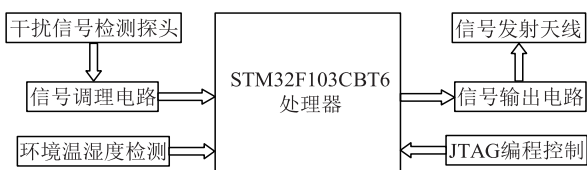


图7 装置原理图

Fig.7 Principle graph of the device

## 4.2 现场测试

基于自适应信号分离和窄带干扰抑制技术所研制变电站电磁净空间生成装置,2017年9月在南京220 kV双闸变电站现场非接触式近电告警测试工作、GIS局部放电检测中实际使用,如图8所示。

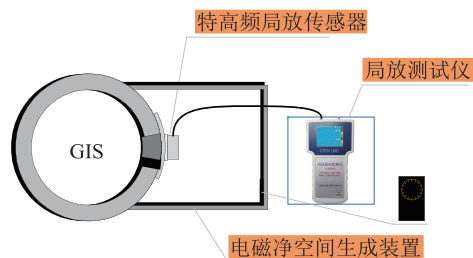


图8 装置应用

Fig.8 Application of the device

围绕站内主变、母线及开关设备等主要设备附件的不同位置进行试验,取部分典型测试数据记录在表1,再选取典型7个测试点分别进行原电场强度和使用电磁净空间生成装置后的电场强度测量。

抑制效果分析如图9所示,其中黄色曲线为未使用电磁净空间生成装置利用电场强度测量仪所检测到的电场强度曲线,绿色曲线为使用电磁净空

表1 典型测点结果对比

Table 1 The comparison of result of typical measurement point

测点编号	无抑制场强/( $\text{kV}\cdot\text{m}^{-1}$ )	抑制后场强/( $\text{kV}\cdot\text{m}^{-1}$ )
1	0.54	0.05
2	0.87	0.09
3	0.96	0.11
4	1.75	0.18
5	2.43	0.27
6	1.45	0.16
7	0.21	0.01

间生成装置对低频干扰信号进行抑制后利用电场强度测量仪再次检测到的电场强度曲线。从图9中可见,电磁净空间生成装置对试验场所中低频信号干扰实现了有效的抑制。

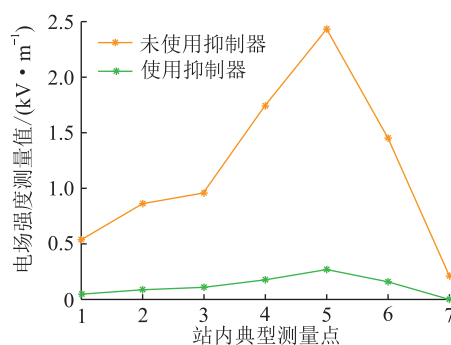


图9 电磁净空间生成装置效果

Fig.9 The Performance of electromagnetic clean space production device

2018年7月该装置应用于南京地区500 kV秦淮变负荷波动较大<sup>[18-20]</sup>时的主变铁芯接地电流测量,效果达到预期。目前,该装置已先后在南京地区多座220 kV和500 kV变电站应用,试验结果表明该装置可在变电站复杂电磁环境下,通过对工频窄带干扰信号的抑制,为变电站内相关设备、仪器相对干净的电磁环境空间,对变电站一次设备局部放电检测等试验的高质量开展提供了技术保障。

## 5 结语

基于对自适应滤波器的研究,运用最小均方误差准则及LMS算法,完成了自适应信号分离器设计,进一步研究了窄带干扰抑制方法,从时域与频域分别实现了窄带干扰抑制,通过仿真实现后,取得了较理想的预期效果。所研制的电磁净空间生成装置原理简单,易于实现,设计方便,对窄带干扰滤除能力强,可以很好地满足变电站生产实际需求,在变电站变电检修、电气试验领域有着较为广泛的应用前景。

## 参考文献:

- [1] 陈昊,朱超,李义峰,等. 输电线路工频电场的计算与测量研究[J]. 电气工程学报,2016,11(5):40-45.  
CHEN Hao, ZHU Chao, LI Yifeng, et al. Research on calculation and measurement of power frequency electric field for transmission line [J]. Journal of Electrical Engineering, 2016, 11(5):40-45.
- [2] ZHANG D, ZHANG Z, JIANG X, et al. Simulation study on the effects of DC electric field on insulator surface pollution deposit[J]. Energies, 2018, 11(3):626.
- [3] 陈昊,徐懂理,黄阮明,等. 交直流电场的实用计算与测量研究[J]. 南京工程学院学报(自然科学版),2018,16(2):1-7.  
CHEN Hao, XU Dongli, HUANG Ruanming, et al. Research on practical calculation and measurement of AC and DC electric field. [J]. Journal of Nanjing Institute of Technology (Natural Science Edition), 2018, 16(2):1-7.
- [4] 唐梦颖,路永玲,徐伟. 江苏电网输变电在线监测装置现状分析及应用建议[J]. 江苏电机工程,2016,35(6):1-4,8  
TANG Mengying, LU Yongling, XU Wei. Status analysis and application suggestions of online monitoring device on power transmission and transformation equipment in Jiangsu Power Grid[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(6):1-4, 8.
- [5] 田涛,陈昊,王志军,等. 考虑舒适度的智能变电站环境监测系统研究与设计[J]. 电力信息与通信技术,2016,14(7):46-49.  
TIAN Tao, CHEN Hao, WANG Zhijun, et al. Research and design for smart substation environment monitoring system considering the comfort[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2016, 14(7):46-49.
- [6] 梁君涵,郑建勇,潘益. 基于多核结构的断路器在线监测系统设计[J]. 电力工程技术,2017,36(6):68-72.  
LIANG Junhan, ZHENG Jianyong, PAN Yi. On-line monitoring system design of circuit breaker based on multi-core structure [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2017, 36(6):68-72.
- [7] 唐炬,黄江岸,张晓星,等. 局部放电在线监测中混频周期性窄带干扰的抑制[J]. 中国电机工程学报,2010,30(13):121-127.  
TANG Ju, HUANG Jiangan, ZHANG Xiaoxing, et al. Suppression of the periodic narrow-band noise with mixed frequencies in partial discharge on-line monitoring [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(13):121-127.
- [8] 谢成,曹张洁,刘黎,等. 基于振荡波局部放电检测的配电网电缆典型缺陷分析与状态评价[J]. 浙江电力,2018,37(8):70-75.  
XIE Cheng, CAO Zhangjie, LIU Li, et al. Typical defects analysis and state evaluation of power distribution cable based on oscillating wave PD detection [J]. Zhejiang Electric Power, 2018, 37(8):70-75.
- [9] 陈庆国,王永红,高文胜,等. 局部放电在线监测的数据分析及现场干扰抑制[J]. 高电压技术,2005(11):10-1230.  
CHEN Qingguo, WANG Yonghong, GAO Wensheng, et al. On-line PD data analysis and interference suppression by software [J]. High Voltage Engineering, 2005(11):10-12, 30.
- [10] 文韬,张乔根,赵军平,等. 特高压 GIS 设备现场标准雷电冲击耐压试验技术的应用[J]. 电力工程技术,2017,36(1):30-33,53.  
WEN Tao, ZHANG Qiaogen, ZHAO Junping, et al. Application of on-site standard lightning impulse test technology for UHV GIS equipment [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1):30-33, 53.
- [11] 赵琳,叶丽雅,杨勇,等. 550 kV GIS 隔离开关操作引起特快速瞬态过电压仿真研究[J]. 浙江电力,2018,37(12):86-92.  
ZHAO Lin, YE Liya, YANG Yong, et al. Simulation study on very fast transient overvoltage during operation of 550 kV GIS disconnecter [J]. Zhejiang Electric Power, 2018, 37(12):86-92.
- [12] 唐炬,樊雷,卓然,等. 用最优化谐波小波包变换抑制局部放电混频随机窄带干扰[J]. 中国电机工程学报,2013,33(31):193-201,24.  
TANG Ju, FAN Lei, ZHUO Ran, et al. Suppression of the random narrow-band noise with mixed frequencies in partial discharge with the optimal harmonic wavelet packet transform [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31):193-201, 24.
- [13] 张宇辉,段伟润,李天云. 抑制局部放电信号中周期性窄带干扰的子空间重构方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(7):178-183.  
ZHANG Yuhui, DUAN Weirun, LI Tianyun. Subspace reconstruction to suppress periodic narrowband noises of partial discharge signals [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(7):178-183.
- [14] 吴丹,万达,梁保卫. 一种改进的窄带干扰抑制算法[J]. 无线电通信技术,2012(1):1-20.  
WU Dan, WAN Da, LIANG Baowei. An improved algorithm for narrow-band interference suppression [J]. Radio Communications Technology, 2012(1):1-20.
- [15] 冉兴萍. 自适应滤波器的研究 [D]. 兰州:西北师范大学,2013.  
RAN Xingpin. Research of adaptive filter [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2013, 6:1-10.
- [16] 张春海,张尔扬. 基于自适应多门限算法的变换域窄带干扰抑制[J]. 电子与信息学报,2006(3):1-5.  
ZHANG Chunhai, ZHANG Eryang. Narrow-band interference suppression in transform domain based on adaptive multi-threshold algorithm [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2006(3):1-5.
- [17] 赵永刚,张泽. 一种基于 FFT 频域分析的窄带干扰抑制方法[J]. 仪器仪表学报,2007(4):1-3.  
ZHAO Yonggang, ZHANG Yi. Method of FFT-based spectral analysis for narrow band interference suppression [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007(4):1-3.
- [18] HUANG Li, YANG Yongbiao, ZHAO Honglei, et al. Time series modeling and filtering method of electric power load stochastic noise [J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2):269-275.
- [19] 陈昊,万秋兰,王玉荣. 基于厚尾均值广义自回归条件异方

差族模型的短期风电功率预测[J]. 电工技术学报, 2016, 31(5): 91-98.

CHEN Hao, WAN Qiulan, WANG Yurong. Short-term wind power forecast based on fat-tailed generalized autoregressive conditional heteroscedasticity-in-mean type models[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(5): 91-98.

[20] 陈昊, 高山, 王玉荣, 等. 基于广义自回归条件异方差偏度峰度模型的风电功率预测方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(12): 3456-3461.

CHEN Hao, GAO Shan, WANG Yurong, et al. Wind power forecasting method based on generalized autoregressive condi-

tional heteroskedasticity with skewness and kurtosis model[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(12): 3456-3461.

作者简介:



陈昊

陈昊(1980)男, 博士, 研究员级高级工程师, 从事电网运维检修工作(E-mail: pingfengma@126.com);

廖英祺(1980), 男, 硕士, 高级工程师, 研究领域为电气工程及其自动化;

张连芹(1987), 女, 硕士, 工程师, 研究领域为变电运维。

## A method of signal separation and narrowband interference suppression based on adaptive filter

CHEN Hao<sup>1</sup>, LIAO Yingqi<sup>2</sup>, ZHANG Lianqin<sup>1</sup>, JIANG Minyi<sup>1</sup>, XU Dongli<sup>3</sup>, JIANG Zenglin<sup>3</sup>

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Maintenance Branch Company, Nanjing 211102, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Company Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210019, China;

3. School of Electrical Engineering Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

**Abstract:** The complex electromagnetic environment in substation may disturb the electrical test in substation. By analyzing the interference signal, the basic principle of the adaptive filter is discussed. An adaptive signal separator are designed according to the minimum mean square error criterion and Least Mean Square (LMS) algorithm. The adaptive signal separator is used to analyze the suppression of low frequency narrow-band interference. With the help of the Fast Fourier Transformation (FFT) algorithm, frequency domain analysis is carried out. Moreover, the suppression of low frequency narrow-band interference is implemented and the practical electromagnetic clean space production device for substation is developed. The feasibility of the proposed design and the efficiency of the device are validated by the simulations in the lab. The field test results in 220 kV and above substations show that the electromagnetic clean space production device for substation based on this method can suppress the interference signal reliably and improve the test efficiency effectively.

**Keywords:** adaptive filter; signal splitter; narrow-band interference suppression; frequency domain analysis

(编辑 杨卫星)