

DOI: 10.7667/PSPC150812

数字量输入式合并单元的白噪声处理

李帅¹, 虞小燕², 龚世敏¹, 赵谦¹, 程成¹, 谢坤¹

(1. 南京国电南自电网自动化有限公司, 江苏 南京 211153; 2. 广州宏能电力工程设计有限公司, 广东 广州 511400)

摘要: 为了提高数字化采样的可靠性及精确度, 白噪声问题一直是工业界和学术界的研究热点。首先, 结合智能变电站的应用实例, 给出了电子式互感器的输出波形, 并对白噪声分量进行频谱分析。进而, 考虑滤波效果、算法稳定性、延时时间等因素, 设计了相应的数字滤波器, 并给出了滤波参数及处理结果。最后, 结合非周期分量衰减时间常数、最大峰值瞬时误差等指标, 分析和评估了滤波算法对暂态性能的影响。分析结果表明, 数字滤波算法可以使白噪声削弱一半以上, 且不会影响暂态性能。

关键词: 智能变电站; 数字量输入式合并单元; 白噪声; 数字滤波; 暂态性能

White noise processing in merging unit of digital input

LI Shuai¹, YU Xiaoyan², GONG Shimin¹, ZHAO Qian¹, CHENG Cheng¹, XIE Kun¹

(1. Guodian Nanjing Automation Co., Ltd., Nanjing 211153, China; 2. Hongneng Power Engineering Design Co., Ltd., Guangzhou 511400, China)

Abstract: To improve the reliability and accuracy of digital sampling, the problem of white noise has become the research focus in the industrial and academic circles. First of all, the output waves related to merging unit of digital input are given, while the component of white noise is analyzed, together with a specific application of smart substation. Additionally, the relative digital filter is designed, considering the processing effect, stability and time delay, while the parameters and processing results are given. Finally, the influence of transient characteristics is researched and estimated, combined with the indexes of decay time constant and maximum peak instantaneous error. The results show that the digital filter could decrease more than half of the white noise, improve the sampling waveform, and would not influence the transient characteristics.

Key words: smart substation; merging unit of digital input; white noise; digital filter; transient characteristics

0 引言

随着科学技术以及社会经济的发展, 智能变电站日新月异, 成为工业界和学术界关注的热点^[1-5]。数字化采样作为智能变电站的重要特征, 与保护、测控、计量等环节息息相关, 关系到变电站的安全运行与可靠监控。

数字化采样主要由合并单元完成, 目前有两种方式: 模拟量输入式合并单元配合传统互感器; 数字量输入式合并单元用于电子式互感器。两种方式各有特色, 均得到了较为广泛的应用^[6-13]。

作为随机过程, 白噪声或多或少地存在于数字化采样环节。若幅值过大, 将会影响采样的波形及精度。对于模拟量输入式合并单元, 需优化硬件电

路, 以降低白噪声的影响。对于数字量输入式合并单元, 由于自身并不具备采样的硬件回路(其采样值来源于电子式互感器输出的通信报文), 若需合并单元处理白噪声, 则需采用软件算法。

本文针对数字量输入式合并单元, 分析了数字化采样的白噪声, 给出了相应的处理方法及滤波效果, 并评估了滤波算法对暂态性能的影响, 具有一定的参考价值。

1 波形分析

系统框图如图 1 所示, 其中电子式互感器采集单元以 9-2 LE 通信协议输出采样数据, 采样率为每周波 256 点; 合并单元将采样数据插值成每周波 80 点, 并以 9-2 通信协议输出。

电子式互感器参数如下: 额定电流(保护、测量复用)1 000 A, 采集单元固定延时 365 μs 。

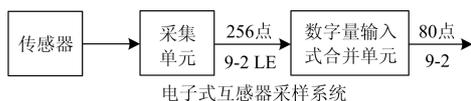


图 1 系统框图

Fig. 1 System diagram

试验时发现, 电子式互感器输出的采样值具有较大的纹波, 图 2 给出了加载 92 A 电流时的采样值波形。

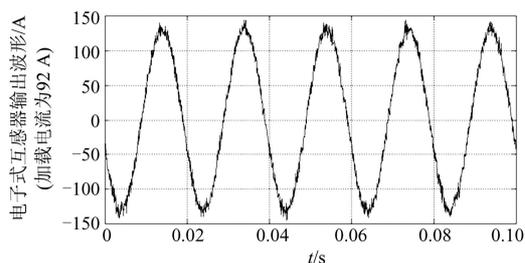


图 2 加载 92 A 电流时的电子式互感器采样值输出波形

Fig. 2 ECT output wave (the input current is 92 A)

断开外部激励量, 此时采样波形如图 3 所示。对该采样数据进行 FFT 分析, 如图 4 所示, 其中纵坐标为各次谐波的幅值。不难发现, 即使不加载电流, 电子式互感器的输出波形也有较大的白噪声, 遍布 0~6400 Hz 整个频带。该噪声由电子式互感器采样系统产生, 与外部加载的激励量无关。

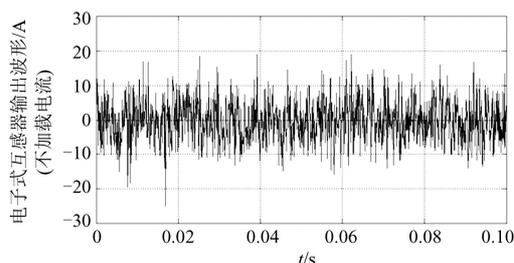


图 3 不加载电流时的电子式互感器采样值输出波形

Fig. 3 ECT output wave (the input current is 0 A)

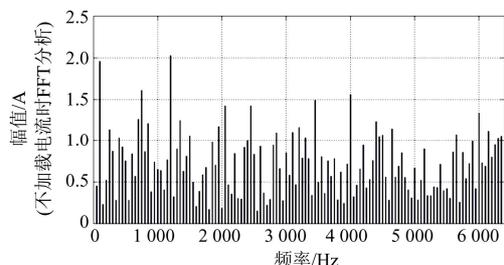


图 4 不加载电流时的采样数据 FFT 分析

Fig. 4 FFT analysis of output wave (the input current is 0 A)

2 白噪声处理

对于白噪声的处理, 有两种方案:

(1) 优化电子式互感器的采样回路, 在白噪声产生的源头加以削弱;

(2) 采用一定的软件算法, 通过合并单元对采样波形进行处理。

两种方案各有针对性, 本文着重讨论方案 2。

2.1 白噪声的叠加方式

由图 1 不难发现, 本系统存在采样率转换, 电子式互感器的采样率为 12 800 Hz(每周波 256 点), 合并单元输出的采样率为 4 000 Hz(每周波 80 点)。

这种情况下, 根据 Shannon 采样定理, 白噪声主要通过两种方式来影响合并电压的采样值输出:

(1) 0~2 000 Hz 的分量, 直接叠加到正常波形;

(2) 2 000~6 400 Hz 的分量, 通过频率混叠, 叠加到 0~2 000 Hz。

无论哪种方式, 均会对正常波形产生影响, 需要加以处理。

2.2 滤波器设计

针对白噪声, 信号处理领域的专家、学者提出了多种办法^[14-17]。考虑算法复杂度等因素, 本文采用数字滤波的方法。

由于白噪声分布在全频段(0~6400 Hz), 任何滤波算法都无法取得完美的效果。考虑到有效信号均位于低频段, 本文采用低通滤波。

数字滤波算法可以分为两大类: 无限长单位冲激响应(Infinite Impulse Response, IIR)滤波器、有限长单位冲激响应(Finite Impulse Response, FIR)滤波器^[18]。由于 FIR 不存在零之外的极点, 一定是稳定的, 本文采用 FIR 滤波器。

FIR 滤波器的迭代公式及传递函数分别如式(1)、式(2)所示^[19-20]。

$$y(n) = a_0 \cdot x(n) + a_1 \cdot x(n-1) + \dots + a_n \cdot x(0) \quad (1)$$

$$H(z) = a_0 + a_1 \cdot z^{-1} + \dots + a_n \cdot z^{-n} \quad (2)$$

其中, n 为滤波器阶数。一般而言, 阶数越高, 滤波效果越好, 但延时时间也会增加。

延时时间的计算公式如式(3)所示。式中, f_s 为采样频率。

$$t_d = \frac{n}{2f_s} \quad (3)$$

综合考虑延时时间、滤波效果等因素, 设计了参数如表 1 所示的 8 阶滤波器, 其延时时间为 312.5 μs 。

表 1 滤波器参数

Table 1 Coefficients of LPF

系数	取值
a_0	-0.018 5
a_1	-0.015 4
a_2	0.087 4
a_3	0.266 5
a_4	0.36
a_5	0.266 5
a_6	0.087 4
a_7	-0.015 4
a_8	-0.018 5

该滤波器的幅频响应曲线如图 5 所示。不难发现,该滤波器对高频段的信号具有较好的滤波效果;对低频段,尤其 0~0.7 kHz(如图 6 所示),几乎不会产生幅值衰减。

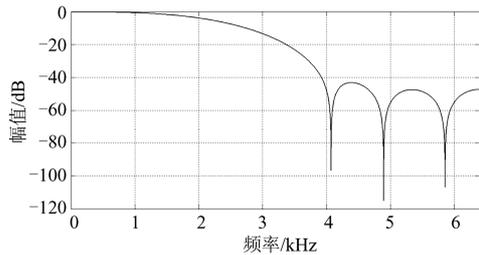


图 5 幅频响应曲线

Fig. 5 Magnitude response

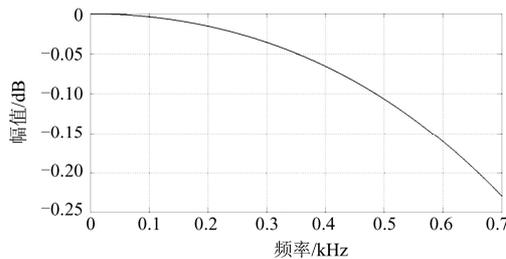


图 6 幅频响应曲线(只显示 0~0.7 kHz)

Fig. 6 Magnitude response (0~0.7 kHz)

该滤波器对直流分量及各次谐波的幅值增益如表 2 所示。

合并单元接收到采集单元的 256 点数据后,先进行滤波算法,再插值成 80 点数据输出。

采集单元固定延时(365 μ s)、滤波器延时(312.5 μ s)等环节将逐级累加,加之合并单元内部的处理延时,最终合并单元输出 9-2 数据的延时时间为 785 μ s。

延时时间存储于 9-2 报文的第 1 通道,保护、测控等接收装置将根据此信息进行采样数据调整与同步,以补偿数据延时。

表 2 直流分量及各次谐波增益

Table 2 Magnitude gain of LPF

谐波次数	幅值增益
0(直流分量)	1(0 dB)
1(基波)	0.999 9 (-0.000 9 dB)
2	0.999 6 (-0.003 7 dB)
3	0.999 0 (-0.008 4 dB)
4	0.998 3 (-0.015 1 dB)
5	0.997 3 (-0.023 9 dB)
6	0.996 0 (-0.034 8 dB)
7	0.994 5 (-0.048 1 dB)
8	0.992 7 (-0.064 0 dB)
9	0.990 5(-0.082 5 dB)
10	0.988 1 (-0.104 1 dB)
11	0.985 3 (-0.128 9 dB)
12	0.982 1 (-0.157 1 dB)
13	0.978 5 (-0.189 0 dB)

2.3 滤波效果

滤波后的波形如图 7、图 8 所示。不难发现,经过滤波算法,采样波形有了较大改善。

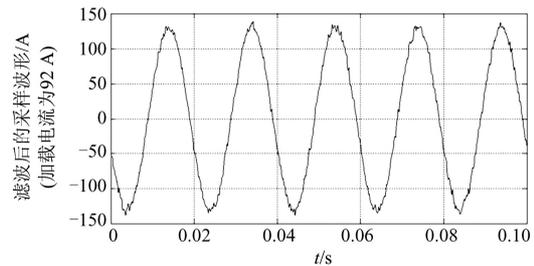


图 7 低通滤波后的采样波形(加载 92 A 电流)

Fig. 7 Wave after LPF (92 A)

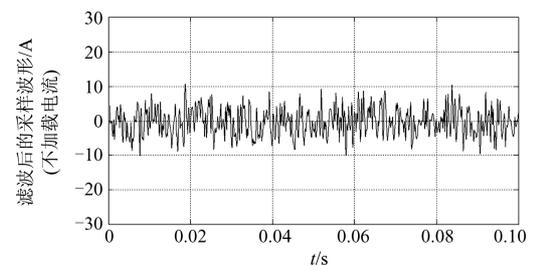


图 8 低通滤波后的采样波形(不加载电流)

Fig. 8 Wave after LPF (0 A)

对图 8 所示的数据进行 FFT 分析,如图 9 所示。从 FFT 分析结果可以看出,经过滤波算法,高频段的噪声得到了较大抑制。

合并单元输出时,滤波的输出还要经插值算法(256 点插值为 80 点),其波形如图 10、图 11 所示。

从上述波形可以发现,经过软件算法的处理,采样波形达到了预定效果。

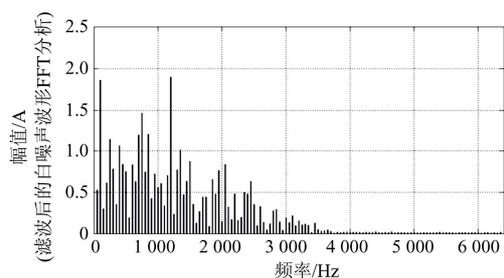


图 9 滤波后的采样数据 FFT 分析(不加载电流)
Fig. 9 FFT analysis after LPF (0 A)

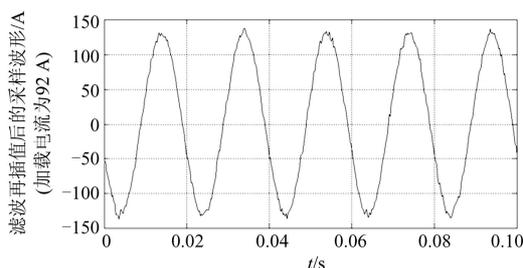


图 10 低通滤波再插值后的采样波形(加载 92 A 电流)
Fig. 10 Wave after LPF and linear interpolation (92 A)

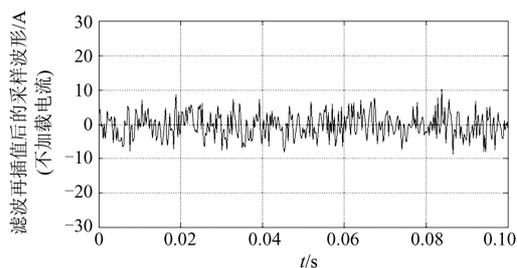


图 11 低通滤波再插值后的采样波形(不加载电流)
Fig. 11 Wave after LPF and linear interpolation (0 A)

3 暂态性能评估

暂态过程作为电力系统的重要运行状态之一,与继电保护等环节密切相关。因此,需要评估滤波算法对暂态性能的影响。

这里重点分析非周期分量衰减时间常数、最大峰值瞬时误差等暂态性能指标。

3.1 非周期分量衰减时间常数

非周期分量衰减时间常数的模拟输入波形如图 12 所示。

非周期分量衰减时间常数计算公式为^[21-22]

$$\tau = 0.09 / \ln(I_p / (I_5 - I_p)) \quad (4)$$

其中: I_5 为第 5 波峰的峰值; I_p 为稳态电流峰值; \ln 为自然对数函数。原始波形的衰减时间常数为 100 ms。

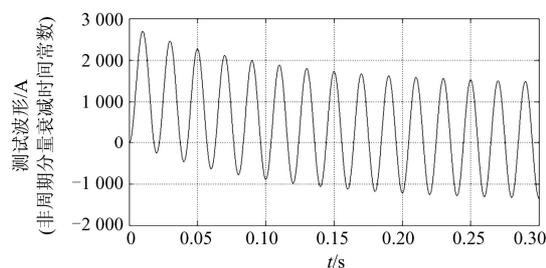


图 12 非周期分量衰减时间常数的模拟输入波形
Fig. 12 Wave of decay time constant

经过低通滤波及插值后的采样波形如图 13、图 14 所示(已补偿延时)。

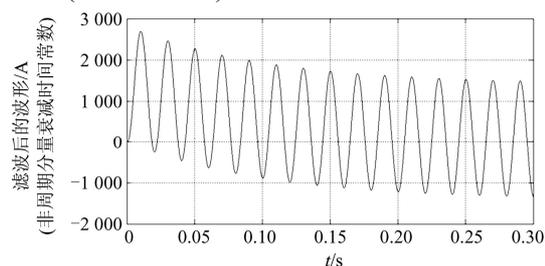


图 13 低通滤波后的非周期分量衰减时间常数波形
Fig. 13 Wave after LPF (decay time constant)

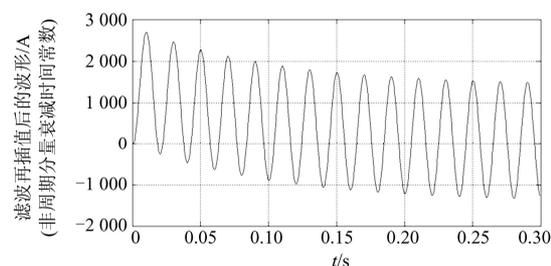


图 14 低通滤波再插值后的非周期分量衰减时间常数波形
Fig. 14 Wave after LPF and interpolation (decay time constant)

由公式(4)计算出处理后的非周期分量衰减时间常数为 100 ms。显然,滤波算法不会影响非周期分量衰减时间常数。

3.2 最大峰值瞬时误差

最大峰值瞬时误差的模拟输入波形如图 15 所示,故障类型为永久性故障 20 倍大电流。

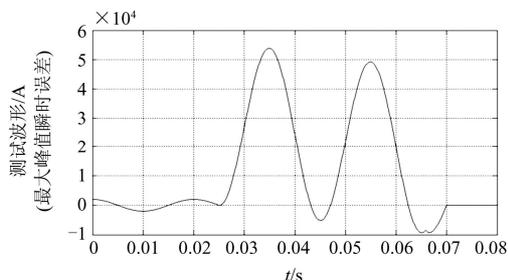


图 15 最大峰值瞬时误差的模拟输入波形
Fig. 15 Wave of maximum peak instantaneous error

最大峰值瞬时误差计算公式为^[23]

$$\delta = 100 \cdot i_{\delta} / (\sqrt{2} \cdot I_{psc}) \% \quad (5)$$

式中： i_{δ} 为最大瞬时误差电流； I_{psc} 为暂态的额定一次短路电流。

经过低通滤波及插值后的采样波形如图 16、图 17 所示(已补偿延时)。

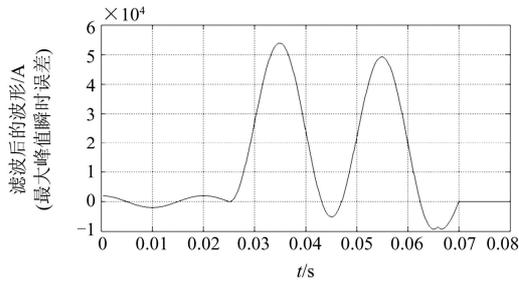


图 16 低通滤波后的最大峰值瞬时误差波形

Fig. 16 Wave after LPF (maximum peak instantaneous error)

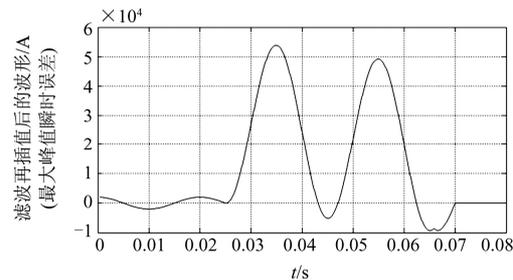


图 17 低通滤波再插值后的最大峰值瞬时误差波形

Fig. 17 Wave after LPF and interpolation (maximum peak instantaneous error)

由公式(5)计算处理前后的最大峰值瞬时误差为 0.07%，几乎可以忽略。

基于上述分析，本文设计的数字滤波器不会影响系统的暂态性能。

4 结语

本文通过分析电子式互感器的输出波形，设计了数字滤波算法，有效削弱了白噪声的影响；针对非周期分量衰减时间常数、最大峰值瞬时误差等指标，评估了滤波算法对暂态特性的影响，结果表明所提滤波算法对全偏移暂态电流的评估影响较小，可以忽略。由于时间和精力有限，滤波参数优化、所提滤波算法对暂态特性的进一步影响将作为本文今后的研究方向。

参考文献

[1] 王同文, 谢民, 孙月琴, 等. 智能变电站继电保护系统可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 58-66.

WANG Tongwen, XIE Min, SUN Yueqin, et al. Analysis of reliability for relay protection systems in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 58-66.

[2] 于同伟, 蔡玉朋, 金世鑫. 一种面向智能变电站的广域各自投系统的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 129-135.

YU Tongwei, CAI Yupeng, JIN Shixin. An application for smart substation-oriented wide-area backup automatic switch[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 129-135.

[3] 刘颖. 智能变电站全寿命周期“即插即用”技术体系的研究与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 23-28.

LIU Ying. Research and application on the technology system of plug & play in the smart substation's life cycle[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 23-28.

[4] 余高旺. 新一代智能变电站中多功能测控装置的研制与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 127-132.

YU Gaowang. Research and application of multifunctional measurement & control device of new generation smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 127-132.

[5] 刘振亚. 智能电网技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.

[6] 李英明, 郑拓夫, 周水斌, 等. 一种智能变电站合并单元关键环节的实现方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(11): 93-98.

LI Yingming, ZHENG Tuofu, ZHOU Shuibin, et al. A realization solution of key links for merging unit in smart substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(11): 93-98.

[7] 周华良, 郑玉平, 姜雷, 等. 适用于合并单元的等间隔采样控制与同步方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(23): 96-100.

ZHOU Hualiang, ZHENG Yuping, JIANG Lei, et al. An equal-interval sampling control and synchronization method for merging unit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(23): 96-100.

[8] 王伟明, 段雄英. 基于 FPGA 的电子式互感器智能合并单元研制[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2): 131-134, 140.

WANG Weiming, DUAN Xiongying. Intelligent merging

- unit of electronic transformer based on FPGA[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 131-134, 140.
- [9] 胡国, 唐成虹, 徐子安, 等. 数字化变电站新型合并单元的研制[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(24): 51-54.
HU Guo, TANG Chenghong, XU Zian, et al. Development of a new type MU for digital substations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(24): 51-54.
- [10] 许玉香, 刘小刚, 马彦琴. 电子式互感器对高精度采样装置的影响及对策分析[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(10): 84-87.
XU Yuxiang, LIU Xiaogang, MA Yanqin. The influence of the electronic instrument transformer on the high precision sampling device and analysis of countermeasures[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(10): 84-87.
- [11] 李罗, 朱静, 白云飞, 等. 基于 RTDS 的合并单元性能测试研究[J]. 高压电器, 2014, 50(7): 24-30.
LI Luo, ZHU Jing, BAI Yunfei, et al. Research on performance test of merging unit based on RTDS[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(7): 24-30.
- [12] 嵇建飞, 袁宇波, 王立辉, 等. 某 110kV 智能变电站合并单元异常情况分析及对策[J]. 电工技术学报, 2015, 30(16): 254-259.
JI Jianfei, YUAN Yubo, WANG Lihui, et al. Analysis and countermeasure on abnormal operation of one 110 kV intelligent substation merging unit[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 254-259.
- [13] 冯利民, 王晓波, 吴联梓, 等. 500 kV GIS 变电站 VFTO 对于电子式互感器的电磁骚扰研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(1): 85-90.
FENG Limin, WANG Xiaobo, WU Lianzi, et al. Study on the impact of VFTO electromagnetic interference on electronic transformers in 500 kV GIS substation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 85-90.
- [14] 唐炬, 彭莉, 谢颜斌, 等. 一种用于抑制白噪声的分层复阈值算法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(21): 25-30.
TANG Ju, PENG Li, XIE Yanbin, et al. An algorithm of complex multilevel threshold for reducing white noise[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(21): 25-30.
- [15] 李天云, 陈昌雷, 程汪刘, 等. 交叉验证方法在电能质量信号白噪声抑制中的应用[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(16): 75-78.
LI Tianyun, CHEN Changlei, CHENG Wangliu, et al. Application of cross validation in power quality de-noising[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(16): 75-78.
- [16] 向东阳, 吴正国, 侯新国, 等. 改进的多小波变换系数相关去噪算法[J]. 高电压技术, 2011, 37(7): 1728-1733.
XIANG Dongyang, WU Zhengguo, HOU Xinguo, et al. Improved denoising method using the correlation of multiwavelet coefficient[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(7): 1728-1733.
- [17] 王永强, 谢军, 律方成. 基于改进量子粒子群优化稀疏分解的局放信号去噪方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 320-329.
WANG Yongqiang, XIE Jun, LÜ Fangcheng. PD signal denoising method based on improved quantum-behaved particle swarm optimization sparse decomposition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 320-329.
- [18] 杨晓非, 何丰. 信号与系统[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [19] 门爱东. 数字信号处理[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [20] 李辉. 数字信号处理及 Matlab 实现[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [21] Q/GDW 11015-2013 模拟量输入式合并单元检测规范[S]. 北京: 国家电网公司, 2011.
- [22] 冯宇, 万罡, 舒开旗, 等. 电流互感器暂态特性试验用标准信号的参数估计[J]. 电网技术, 2014, 38(8): 2263-2267.
FENG Yu, WAN Gang, SHU Kaiqi, et al. Parameter estimation of standard signals for transient characteristics test of current transformer[J]. Power System Technology, 2014, 38(8): 2263-2267.
- [23] GB/T 20840.8-2007 互感器第 8 部分: 电子式电流互感器[S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 2007.

收稿日期: 2015-08-13; 修回日期: 2016-02-01

作者简介:

李 帅 (1984-), 男, 硕士, 工程师, 从事智能变电站过程层设备的开发工作; E-mail: shuai-li@sac-china.com

虞小燕 (1984-), 女, 硕士, 工程师, 从事电力系统自动化研究工作;

龚世敏 (1980-), 男, 硕士, 工程师, 从事电力自动化设备的开发与管理工作。

(编辑 周金梅)